

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA**



**CARACTERIZACIÓN DE EPISODIOS DE OZONO  
TROPOSFÉRICO EN GALICIA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
DISTINTAS TÉCNICAS DE SIMULACIÓN E INTERPRETACIÓN  
DE DATOS DE CAMPO**

**Santiago Saavedra Vázquez**

**Mayo, 2010**



D. SANTIAGO SAAVEDRA VAZQUEZ, estudiante del Programa de Doctorado en Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad de Santiago de Compostela,

EXPONE:

Que presenta esta memoria de investigación titulada “**Caracterización de episodios de ozono troposférico en Galicia mediante la aplicación de distintas técnicas de simulación e interpretación de datos de campo**”, como Tesis Doctoral para optar al grado de Doctor en Ingeniería Química por la Universidade de Santiago de Compostela.

Santiago de Compostela, 14 de Mayo de 2010

Santiago Saavedra Vázquez





D. JOSÉ ANTONIO SOUTO GONZÁLEZ, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Ingeniería Química de la Universidade de Santiago de Compostela,

INFORMO:

Que la presente memoria titulada **“Caracterización de episodios de ozono troposférico en Galicia mediante la aplicación de distintas técnicas de simulación e interpretación de datos de campo”**, que presenta D. Santiago Saavedra Vázquez para optar al grado de Doctor en Ingeniería Química por la Universidade de Santiago de Compostela, ha sido realizada bajo mi supervisión en el Departamento de Ingeniería Química de esta Universidad.

Santiago de Compostela, 14 de Mayo de 2010

Prof. José Antonio Souto González



## **AGRADECIMIENTOS**

---

Este trabajo no hubiera podido desarrollarse sin la colaboración y ayuda de muchos amigos y colaboradores, y aunque se hace difícil resumir en este breve espacio todas las aportaciones y consejos recibidos, me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a todos ellos:

Al profesor José Antonio Souto González, sin cuya ayuda no hubiera sido posible la realización de esta tesis, por su continuo apoyo y confianza en mi trabajo, así como por su esforzada labor de dirección, tanto desde el punto de vista técnico como humano.

Al profesor Juan Casares Long, por su trato y consejos a lo largo de todos estos años, que han facilitado notablemente mi labor diaria.

Al profesor Jordi Vilá-Guerau de Arellano, tanto por su inestimable ayuda en el plano técnico durante mi estancia en la Universidad de Wageningen, como por su magnífico trato durante aquellos inolvidables meses.

A Juan Taboada, por su trato, paciencia y enseñanzas durante mi estancia en MeteoGalicia, además de haber contribuido con numerosos aportes técnicos en todos los aspectos meteorológicos de este trabajo.

Al profesor Vicente Pérez Muñuzuri, que ha tenido la suficiente confianza en mi trabajo como para aceptarme en su equipo durante unos meses que han sido muy importantes para mi formación.

Al resto del equipo de MeteoGalicia, con el cual he compartido un importante período de aprendizaje y muchas otras actividades paralelas. En especial me gustaría destacar la ayuda de Carlos, Eduardo, Breogán, Chus, Lino, Bea, Martín, Pedro, Santi, Ana, Raquel, ...

Al equipo de Medio Ambiente de la UPT Endesa - As Pontes, encabezado por D. José Luis Bermúdez, por su desinteresada colaboración en este trabajo, así como por la cesión de los datos que constituyen el origen del mismo.

Al profesor Carlos Borrego y a su grupo del Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, por su excelente acogida durante el tiempo que he trabajado con ellos.

A José Varela, que puso el colofón final a esta memoria con sus amplios conocimientos de Sistemas de Información Geográfica.

A todos mis compañeros del grupo de Modelización Ambiental, en especial a Anxo, Albertini, Mario, Marcos, David, Pastora y Sadullo, que me han prestado su ayuda en innumerables ocasiones, además de hacer más divertido el día a día en el laboratorio.

No puedo acabar sin hacer una referencia expresa a Modesto, del equipo de Medio Ambiente de la UPT Endesa - As Pontes, que además de haberme facilitado con prontitud todos los datos solicitados, me ha obsequiado con un magnífico trato.



---

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Summary</b> .....	5

## CAPÍTULO 1

---

<b>Introducción</b> .....	9
1.1 El ozono atmosférico. Introducción y marco legislativo europeo.....	9
1.2 Generación de ozono troposférico.....	14
1.3 Transporte y mezcla de ozono troposférico.....	23
1.4 Efectos del ozono sobre la salud y los ecosistemas .....	31
1.5 El ozono en regiones litorales de la península Ibérica .....	34

## CAPÍTULO 2

---

<b>Metodología de Análisis Episódico de Contaminación Atmosférica Fotoquímica</b> .....	41
2.1 Definición de episodio. Criterios de selección. ....	42
2.2 Análisis de la climatología sinóptica. ....	43
2.3 Análisis de las condiciones meteorológicas locales. ....	48
2.4 Análisis de concentraciones de inmisión de ozono troposférico. ....	50
2.5 Análisis de simulaciones meteorológicas y de calidad del aire .....	53
2.6 Establecimiento de hipótesis .....	57

## CAPÍTULO 3

---

<b>Resultados</b> .....	59
3.1 Descripción de la zona de estudio.....	59
3.2 Recopilación de medidas meteorológicas y de inmisión de contaminantes.....	71
3.3 Caracterización de estaciones.....	76
3.4 Situación general del ozono troposférico en el noroeste peninsular.....	87
3.5 Análisis de episodios.....	100
3.6 Análisis de las causas y orígenes de los episodios identificados.....	200

**CAPÍTULO 4**

---

**Conclusiones** ..... 239

    4.1 Conclusiones..... 239

    4.2 Trabajo futuro..... 240

**Conclusions** ..... 243

    4.1 Conclusions..... 243

    4.2 Future work. .... 244

**BIBLIOGRAFÍA**

**Bibliografía** ..... 247

## RESUMEN

---

El ozono es un importante constituyente químico de la atmósfera y, en concreto, el ozono troposférico representa un papel clave en la capacidad oxidante de la atmósfera. Este ozono troposférico se genera preferentemente a partir de la disociación fotoquímica del dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$  y su posterior unión con el oxígeno molecular  $\text{O}_2$ . Las principales fuentes y sumideros de ozono en la troposfera se corresponden con el intercambio de masas de aire entre la estratosfera y la troposfera, la producción o destrucción fotoquímica in-situ y la deposición seca. Sus niveles de fondo en la troposfera se han modificado durante el último siglo, debido a las emisiones antropogénicas de precursores de ozono, de modo que actualmente el ozono es un contaminante monitorizado en la mayoría de las regiones continentales industrializadas y con una elevada población. Además, durante los últimos años, se han registrado episodios de contaminación fotoquímica con elevadas concentraciones de ozono troposférico en muchas zonas rurales en diferentes regiones del globo, situadas lejos de áreas industriales y urbanas.

En la península Ibérica la presencia de ozono troposférico es considerable en todas las regiones, afectando sobre todo a las áreas periféricas y mediterráneas (Millán et al., 1991). Esta notable inmisión de ozono se debe tanto al importante nivel de emisión de precursores asociado al grado de desarrollo industrial, como a las características meteorológicas y climáticas típicas de la península, con condiciones óptimas para el desarrollo de procesos fotoquímicos y la generación de ozono. A pesar de que este producto puede ser ya considerado como uno de los principales contaminantes atmosféricos en nuestro país, la distribución de los estudios sobre contaminación fotoquímica es muy irregular en la península Ibérica en general y en España en particular.

En Galicia, situada en el noroeste peninsular, los estudios sobre contaminación por ozono troposférico son muy escasos (Peña et al., 2000), siendo esta zona la menos analizada a nivel peninsular, junto con la parte oeste de la cornisa cantábrica (Asturias y Cantabria). La razón principal de esta carencia de análisis radica en los bajos niveles medios de ozono registrados en el norte en comparación con la mitad sur y el este de la península Ibérica. Estos niveles medios inferiores de ozono derivan de las condiciones climáticas de estas regiones, claramente menos favorables a la generación fotoquímica de ozono. Sin embargo, durante la época estival y primaveral no son infrecuentes episodios fotoquímicos con altos niveles de ozono, al coincidir factores meteorológicos propicios con precursores fotoquímicos que favorecen el desarrollo de concentraciones potencialmente elevadas de ozono. Como consecuencia, la posibilidad de aparición de episodios de contaminación fotoquímica en estas áreas durante los meses más calurosos del año no es despreciable, sobre todo si se tiene en cuenta el tráfico creciente y la importante industrialización del litoral norte en los últimos años (Saavedra et al., 2007).

Este trabajo de investigación que se presenta para la obtención del título de Doctor se enmarca dentro del escenario descrito, pretendiendo contribuir al conocimiento de la situación actual de la contaminación fotoquímica en Galicia, teniendo en cuenta los escasos registros de ozono troposférico existentes en la Comunidad Autónoma. De acuerdo con ello, los objetivos de la tesis están dirigidos hacia tres aspectos complementarios, como son:

- a) Describir la evolución temporal de los niveles de ozono en la Comunidad Gallega, analizando sus patrones de variabilidad diaria, estacional e interanual, y compararla con la evolución dominante en regiones próximas.

- b) Establecer la influencia de la climatología sinóptica en el desarrollo de episodios de contaminación fotoquímica en el noroeste peninsular.
- c) Establecer las principales causas de los episodios de contaminación fotoquímica con elevados niveles de ozono que se producen en Galicia, distinguiendo entre episodios provocados principalmente por la generación fotoquímica local y episodios con una influencia importante del transporte de ozono desde regiones limítrofes.

Para alcanzar estos objetivos, se recogieron datos horarios de ozono y otros precursores fotoquímicos como  $\text{NO}_x$  en las estaciones de calidad de aire disponibles en la Comunidad Gallega, durante el período temporal comprendido entre Enero de 2002 y Agosto de 2007. Las principales redes de medición que suministraron los datos empleados fueron la Red Gallega de Calidad de Aire (ocho estaciones de medida de ozono, de las cuales cinco registran ozono de forma continua), la Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo (una estación EMEP en el territorio gallego y dos en las regiones limítrofes) y la Red de Calidad de Aire de Portugal (dos estaciones rurales seleccionadas en la región norte de Portugal). Tras la recopilación de datos de inmisión, se estableció una metodología destinada a lograr los objetivos mencionados, que se describe a continuación.

La evolución temporal de los niveles de ozono en Galicia se derivó del análisis de las series temporales de ozono citadas, estableciendo comparaciones entre las estaciones utilizadas y analizando sus tendencias en relación a otras estaciones europeas citadas en la bibliografía.

El estudio episódico comenzó con la identificación de períodos con altos niveles de inmisión de ozono superficial, siendo el criterio principal para su consideración como episodio fotoquímico la presencia de un valor umbral horario de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en cualquiera de las estaciones analizadas en Galicia. Con estos criterios se identificaron 32 episodios significativos. Teniendo en cuenta que los procesos implicados en la generación de ozono experimentan retardos muy variables dependiendo de las condiciones meteorológicas y las concentraciones de precursores, se fijó una duración mínima de siete días para cada episodio, tomando como punto central la jornada con la inmisión máxima de ozono troposférico.

Tras la selección de los episodios y el establecimiento de su duración, se comenzó por el análisis de las condiciones sinópticas dominantes durante cada uno de ellos, para determinar los patrones sinópticos característicos de cada episodio. La clasificación sinóptica de episodios se estableció únicamente en función de la jornada que registraba la concentración de inmisión máxima de ozono troposférico, y se siguió una clasificación de carácter subjetivo, en concreto la publicada por Font Tullot para la península Ibérica (Font-Tullot, 1983). Una vez obtenida esta clasificación, se realizó un breve análisis de los principales tipos sinópticos relacionados con la existencia de altos niveles de contaminación fotoquímica en Galicia.

Relacionado con el análisis sinóptico, se realizó la simulación de retrotrayectorias (Draxler y Hess, 1997) de las masas de aire desde el instante central de cada episodio; a partir de estas retrotrayectorias de tres días de duración se realizó una nueva clasificación de los episodios de ozono, en función del recorrido de las masas de aire en los días previos al registro de la concentración máxima de ozono en cada uno de ellos. Esta clasificación se ha utilizado para establecer las rutas más frecuentes del transporte atmosférico de ozono troposférico hacia la zona de estudio, contribuyendo así a identificar y evaluar el potencial contaminante de regiones distantes, que pueden constituir posibles focos de la contaminación fotoquímica en el norte de Galicia.

El tercer aspecto del análisis episódico se centró en el estudio de las condiciones meteorológicas locales dominantes durante el desarrollo de los episodios. Se presenta una breve descripción de la meteorología local propia de los principales tipos sinópticos relacionados con ocurrencia de episodios de contaminación fotoquímica, y posteriormente un análisis de las variables meteorológicas con una mayor influencia en la generación fotoquímica, dispersión y transporte de ozono, como temperatura, intensidad y dirección de viento, radiación solar y precipitación.



En el caso de episodios con comportamientos locales singulares se desarrollaron simulaciones meteorológicas de alta resolución con el modelo MM5, a fin de reproducir los fenómenos meteorológicos locales que previsiblemente tuvieron una influencia significativa en los niveles de ozono troposférico. Así, la circulación de brisas marinas de poniente en oposición a la circulación sinóptica de componente E de algunos episodios destacó como un fenómeno local de especial interés (Carvalho et al., 2006), debido a la creación de una célula de recirculación que incrementa los niveles superficiales de ozono.

Una vez analizada la información meteorológica, tanto a nivel sinóptico como a nivel regional y local, se estudió la evolución temporal de las concentraciones horarias de inmisión de ozono y óxidos de nitrógeno en cada episodio, tratando de buscar patrones de comportamiento repetidos. A partir de la evolución del ozono durante los períodos diurnos y nocturnos se obtuvo una nueva clasificación de episodios, basada respectivamente en la duración de las concentraciones máximas y en la persistencia del ozono registrado durante la noche.

Finalmente se recogieron resultados de simulaciones meteorológicas y de calidad de aire de diferentes modelos europeos de predicción de calidad de aire, como EURAD (Memmesheimer et al., 2001) y CHIMERE (Prev'Air, 2009), para facilitar la integración de toda la información anterior y completar con datos sintéticos la evolución temporal y distribución espacial del ozono troposférico en aquellas zonas en las cuales no se dispone de medidas.

Como resultado final se formularon y analizaron diversas hipótesis que permiten explicar las causas de los niveles de ozono registrados durante los períodos seleccionados, a partir de los datos procesados previamente. Se establece de este modo la posible procedencia del ozono medido en cada episodio, diferenciando entre la generación local y el transporte alóctono de ozono. En este último caso, se ha buscado la identificación de las regiones geográficas que actúan como áreas fuente del ozono que llega a la Comunidad Gallega.



## SUMMARY

---

Ozone is an important chemical component of the atmosphere. Particularly, tropospheric ozone is a trace gas which plays a key role in the oxidising capacity of the atmosphere. Tropospheric ozone is mainly generated from photochemical dissociation of nitrogen dioxide  $\text{NO}_2$  and posterior link with molecular oxygen  $\text{O}_2$ . Major ozone sources and sinks in the troposphere are the air mass exchange between the stratosphere and troposphere, in situ photochemical production or destruction and surface dry deposition. Tropospheric background ozone levels have been modified during the last century due to increasing anthropogenic ozone precursors, so surface ozone is mainly monitored in industrialised and relatively highly-populated continental regions at present. Besides, in the last years photochemical pollution episodes with high levels of tropospheric ozone have been registered in different rural zones worldwide, which are far away from urban and industrial areas.

High ground level ozone concentration (glc) has been extensively measured in all regions of the Iberian Peninsula, mainly affecting peripheral and Mediterranean areas (Millán et al., 1991). These significant ozone glc's are related to both high emission levels of photochemical precursors (due to the industrial development) and climatic conditions, as typical peninsular weather conditions are suitable for photochemical processes and ozone formation. Even though this chemical product must be considered one of main air pollutants in our country, distribution of ozone research studies along Iberian Peninsula as a whole and along Spain as particular case is quite irregular nowadays.

In Galicia, placed at the northwestern peninsular coast, studies of tropospheric ozone pollution are very few (Peña et al., 2000), being one of the less studied regions at the Iberian Peninsula, along with the western part of the Cantabrian coast (Asturias and Cantabria). The main reason for this lack of analysis is the low average level of ozone recorded in the north compared to southern and eastern half of the Iberian Peninsula. These lower average ozone levels resulting from climatic conditions in these regions, clearly less favourable for photochemical generation of ozone. However events with high levels of photochemical ozone during summer and spring are not rare when favourable meteorological conditions coincide with photochemical precursors, causing the development of potentially high surface ozone concentrations. As a result, the possibility of occurrence of episodes of photochemical pollution in these areas during the hottest months of the year is not negligible, especially when taking into account the increased traffic and important industrialization of the northern coast in recent years (Saavedra et al., 2007).

Taking into account the few existing records of tropospheric ozone measurements in the Galician region, this research work presented to obtain my PhD Degree in Chemical Engineering is part of the scenario described, trying to contribute to the knowledge of the current state of photochemical pollution in Galicia. Accordingly, the objectives of this PhD Thesis are directed towards three complementary areas, such as:

- a) To describe the time series of ozone levels in Galicia, analyzing their daily, seasonal and interannual patterns of variability, and compare it with the dominant trends in surrounding regions.
- b) To establish the influence of synoptic climatology in the development of photochemical pollution episodes in northwestern Spain.
- c) To establish the main causes of photochemical pollution episodes with high ozone levels that occur in Galicia, distinguishing between episodes caused mainly by local

photochemical ozone production and episodes with a significant contribution of the ozone transport from surrounding regions.

To achieve these objectives, hourly data of ozone and other photochemical precursors such as NO<sub>x</sub> collected from the air quality stations available in Galicia and surrounding areas, from January 2002 to August 2007, were analysed. The main monitoring networks that provided these data were the Galician Network of Air Quality (eight stations measuring ozone, of which five ozone recorded continuously), the Spanish Monitoring Network of Atmospheric Pollution (an EMEP station in Galicia and two more selected in surrounding regions) and the Portuguese Network of Background Air Quality (two selected rural stations in the northern region of Portugal). A new methodology for analysis was established, as follows.

The evolution of ozone levels in Galicia was derived from the analysis of aforementioned time series of ozone, drawing comparisons between the stations data and analyzing their trends in relation to other European stations cited in the literature.

Apart from other criteria as ozone glc day-by-day increment and daily ozone level, the identification of episodic periods with high levels of ozone glc was based in a threshold hourly value of 150 µg/m<sup>3</sup> achieved in any of the stations analyzed in Galicia. With these criteria, thirty-two episodes were identified. As the processes involved in the ozone net generation suffer highly variable delays depending on weather and chemical conditions, a minimum period of seven days for each episode was defined, taking as central point of each episode the day with the maximum glc of tropospheric ozone.

Following the episodes identification, an analysis of synoptic conditions during every episode was done, in order to determine their main synoptic patterns and their possible relationship to the ozone levels characteristic of each episode. This synoptic classification was related to the day with maximum ozone glc, and it was done by using the synoptic methodology by Font Tullot for the Iberian Peninsula (Font-Tullot, 1983). After that, a brief analysis was done about the main synoptic types associated to the existence of high levels of photochemical pollution in Galicia.

In a similar scale to the synoptic analysis, 3-days backward-trajectories of air masses were traced using the HYSPLIT model (Draxler y Hess, 1997), starting at the ozone glc episode peak. These trajectories allow to classify the episodes depending on the regions crossed by them. Therefore, the most frequent atmospheric tropospheric ozone transport pathways around the Galician region were established, in order to consider the potential long-term contribution of ozone and its precursors to Galicia.

The third step in this episodic analysis methodology was focused in the local weather conditions. A brief analysis of local meteorology during the main synoptic patterns associated to the occurrence of photochemical pollution episodes is presented. Then, the most significant local meteorological parameters in terms of photochemical generation and pollutants dispersion (temperature, solar radiation, wind and precipitation) are considered during the ozone episodes.

This analysis allows to identify specific ozone episodes with a local meteorological influence different than synoptic conditions. In this case, a high-resolution meteorological simulation of local meteorological conditions using MM5 model were developed in order to achieve a better understanding of these local processes. As an example, typical sea breezes produce a western circulation in opposite to eastwards synoptic flux, creating a recycling cell that increases the surface ozone levels (Carvalho et al., 2006).

After analyzing synoptic, regional (backward-trajectories) and local meteorological data, different patterns in time series of hourly average ozone and oxides of nitrogen glc were identified. From these patterns, episodes were classified considering both daily ozone peak duration and nocturnal ozone persistence.

These analysis were integrated considering the results from different European air quality forecast models as EURAD (Memmesheimer et al., 2001) or CHIMERE (Prev'Air, 2009), in

order to fill the significant spatial gaps in the available air quality data. As a result, a better understanding of the regional ozone transport and local ozone evolution was achieved.

As the final result of this analysis integration, new features about the possible origin of ozone levels registered during the selected episodes were obtained. Specifically, the probable origin of ozone levels and peaks measured in every episode during the period 2002-2007 was established, distinguishing between local generation and regional ozone transport. In the latter case, the identification of the surrounding regions with more apportioning of ozone (and ozone precursors) to Galicia was considered.



## INTRODUCCIÓN

En esta introducción se describen los procesos físicoquímicos y meteorológicos que determinan la generación y distribución del ozono troposférico, así como los efectos potenciales que la exposición a altos niveles de ozono provoca en la salud humana y los ecosistemas. Finalmente, se realiza una revisión sobre la contaminación de origen fotoquímico en las áreas litorales de la península Ibérica.

### 1.1 El ozono atmosférico. Introducción y marco legislativo europeo

El ozono ( $O_3$ ) es un gas oxidante reactivo producido de forma natural en cantidades traza en la atmósfera terrestre. La molécula de ozono se compone de tres átomos de oxígeno (en contraste con el oxígeno molecular,  $O_2$ , que forma el 21% de aire atmosférico) y se forma cuando un átomo de oxígeno, producido generalmente en la troposfera por disociación fotoquímica del dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), se combina con el oxígeno molecular para formar ozono. El ozono fue descubierto por Schönbein a mediados del siglo XIX, siendo también este investigador el primero en detectar el ozono en el aire. La primera medida precisa del ozono en la baja atmósfera fue realizada por Strutt en 1918, utilizando su propiedad de absorción de la luz ultravioleta para cuantificar el ozono a nivel del suelo a partir de la atenuación de esta radiación a lo largo de su camino óptico en la atmósfera.

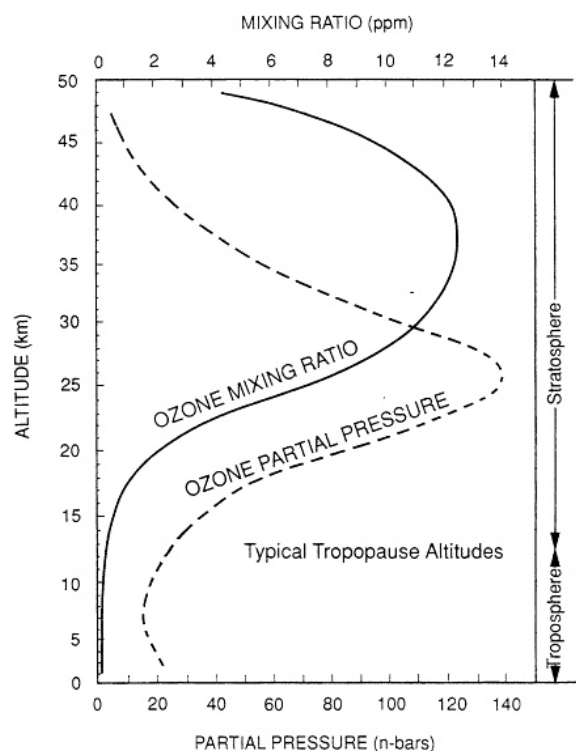


Figura 1.1: "Perfil vertical de la distribución media anual de ozono global. Fuente: National Research Council (USA), 1991"

La mayor parte del ozono atmosférico terrestre se encuentra en la estratosfera (porción de la atmósfera entre los 10 y los 50 kilómetros de altitud), en la cual desempeña un papel crítico en la absorción de la radiación ultravioleta emitida por el sol. Una representación de la presión parcial de ozono y de la razón de mezcla en función de la altitud se presenta en la figura 1.1 para un típico perfil latitudinal. El máximo de presión parcial mostrado en esta figura se corresponde con la capa de ozono estratosférico, que presenta la máxima concentración de ozono, como presión parcial, a 20-30 km de altitud e impide que la mayoría de la radiación solar en el rango de longitud de onda de 200 a 300 nm alcance la atmósfera inferior y la superficie terrestre, donde provocaría daños en la vida animal y vegetal.

Durante las pasadas décadas, las mejoras en la monitorización del ozono estratosférico con instrumentos terrestres, dispuestos en aviones o en satélites ha permitido observar cambios en las cantidades de ozono presentes en la atmósfera. Uno de los cambios más destacados ha sido la destrucción catalítica de porciones significativas de la capa de ozono estratosférico, cuyo reflejo más claro es el agujero de ozono antártico que se observa cada primavera austral, resultado de la fotoquímica estratosférica de compuestos halogenados combinada con el vórtica polar y otros fenómenos: la descomposición de estos compuestos halocarbonados de origen antropogénico en la estratosfera genera radicales que consumen catalíticamente la molécula de ozono. Actualmente, este problema se ha atenuado mediante la prohibición gradual del uso de compuestos clorofluorocarbonados a fin de restringir su emisión a la atmósfera.

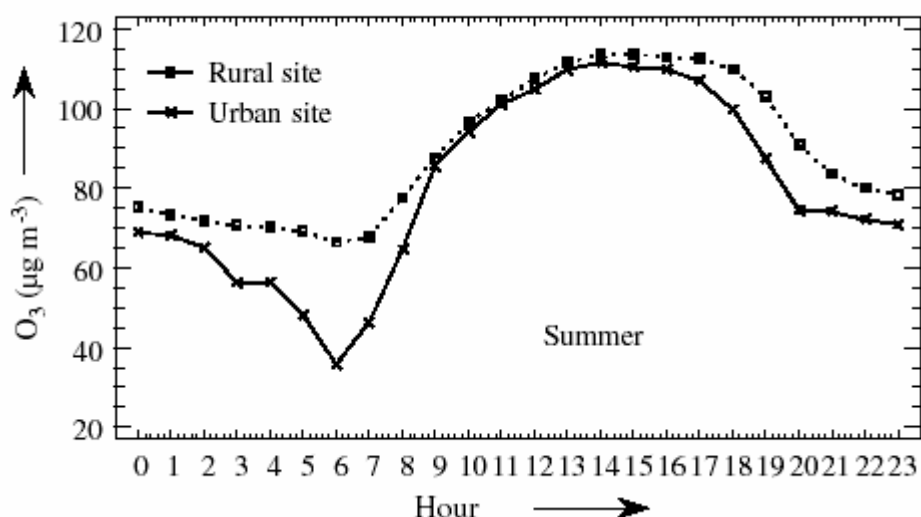


Figura 1.2: “Evolución diaria del promedio horario de los niveles de ozono durante el verano en dos estaciones de la provincia de Málaga, en el sur de la península Ibérica. Se observa la mayor destrucción de ozono durante la noche en la estación de carácter urbano, causada por los mayores concentraciones de NO. Fuente: Dueñas et al., 2004”

Una porción muy inferior del ozono generado de forma natural se encuentra en la troposfera, que es la capa inferior de la atmósfera y tiene unos 10 km de espesor. Los datos representados en la figura 1.1 muestran que las concentraciones naturales de ozono troposférico son muy bajas, generalmente unas pocas decenas de partes por billón (ppb) como razón de mezcla, si se comparan con las más de 10000 ppb (10 partes por millón) que se suelen registrar en la razón de mezcla de los picos de la estratosfera. Sin embargo, la atmósfera se va haciendo exponencialmente menos espesa con la altura, de modo que el pico de la razón de mezcla de ozono aparece a una altura mayor que el pico en presión parcial (concentración), como se muestra en la figura 1.1. A pesar de ello, una cantidad significativa de ozono, sobre el 10-15% del total del ozono atmosférico, se encuentra en la troposfera de forma natural (Brasseur, 2003). Del mismo modo, las medidas de ozono global indican un incremento general de la razón de mezcla con la altitud, indicativo del intercambio estratosfera-troposfera y de la mayor eficiencia de la producción de ozono en la troposfera superior.



La base de datos de observaciones de ozono troposférico superficial para áreas rurales y suburbanas es notablemente amplia para Norte América y Europa. En la mayoría de las zonas rurales, las concentraciones de ozono presentan variaciones diarias que conforman un ciclo diurno clásico, con un mínimo durante las primeras horas de la mañana, antes del amanecer, y un máximo en las últimas horas de la tarde (figura 1.2). Este patrón procede de la producción fotoquímica diaria, o del transporte descendente de aire rico en ozono desde capas superiores, combinado con las pérdidas de ozono por deposición seca y reacción química con el óxido nítrico NO durante la noche, cuando la generación fotoquímica cesa y el transporte vertical es inhibido por inversiones térmicas.

En lugares próximos a grandes fuentes de NO, el mínimo nocturno de ozono puede ser bastante acusado, a causa de la rápida reacción entre el ozono y el NO. De hecho, en muchas áreas urbanas las fuentes de NO son suficientemente intensas como para causar la desaparición completa del ozono durante la noche. Además de las variaciones propias del ciclo diario, las concentraciones de ozono en una localidad determinada pueden variar considerablemente de un día para otro. En zonas urbanas no es infrecuente que las concentraciones máximas de ozono diario varíen con un factor de 2 ó 3 entre un día y el siguiente, a medida que cambian las condiciones meteorológicas. En el interior de las grandes áreas urbanas y a sotavento de éstas, bajo ciertas condiciones meteorológicas, las emisiones de NO<sub>x</sub> (NO<sub>2</sub> + NO) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) pueden causar concentraciones extremas de ozono, entre 400 - 800 µg/m<sup>3</sup>. Esta producción de ozono y especies oxidantes relacionadas recibe el nombre de contaminación fotoquímica, y fue observada por primera vez en Los Ángeles en la década de 1940. La base de datos de las observaciones de ozono indica un descenso sistemático de las concentraciones máximas de ozono a medida que se pasa de áreas urbanas y suburbanas a áreas rurales y de ahí a zonas aisladas. Las concentraciones máximas diarias de ozono dentro de la capa de mezcla tienden a ser superiores en las atmósferas urbanas y suburbanas, en las que se han observado concentraciones claramente superiores a los 400 µg/m<sup>3</sup>. Las concentraciones de ozono en áreas rurales tienden a ser más moderadas y raras veces superan los 300 µg/m<sup>3</sup>. En zonas rurales aisladas, las concentraciones máximas suelen oscilar entre los 40 y los 80 µg/m<sup>3</sup> (Seinfeld y Pandis, 1998).

#### *1.1.1 Tendencias actuales de los valores de ozono*

Las tendencias en la concentración de ozono superficial debido a cambios en las emisiones pueden estar enmascaradas por las variaciones meteorológicas, debido a la doble influencia que tienen ambos factores en la producción de ozono, al ser éste un contaminante secundario. Sin embargo, los valores máximos de ozono ("valores pico") disminuyeron en muchas regiones de Europa durante los años 90, mientras que los valores medios y los valores de fondo se incrementaron.

Se estima que las concentraciones superficiales de ozono registradas en áreas representativas de los niveles de fondo se han incrementado 2 ó 3 veces durante el siglo XX, oscilando en torno a 20 µg/m<sup>3</sup> al principio de ese siglo (Volz y Kley, 1988). Sin embargo, hay muchos problemas asociados con esas medidas iniciales, y los niveles de ozono pre-industrial podrían haber estado próximos a los 40 µg/m<sup>3</sup>, como los medidos en Suiza durante los años 50 (Amann et al., 2008).

A pesar de las discrepancias en función del origen de los datos estudiados (sondas de ozono, datos de estaciones en superficie, modelización), los análisis apuntan a un aumento general y continuo del ozono troposférico al menos hasta los años 90; este incremento se produce no sólo en Europa, con incrementos del 1-2% anual en las concentraciones de fondo, medidas en áreas europeas relativamente aisladas durante el período 1958-1988 (Seinfeld y Pandis, 1998), sino también en Asia (Wu y Chang, 2001), dentro de un incremento de los niveles de fondo a escala global: los datos entre los Andes y el Pacífico, basados en las medidas del TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) entre 1979 y 1992, indican un incremento de 1.48% anual en las concentraciones de ozono troposférico en la zona Pacífico-Tropical de América del Sur (Seinfeld y Pandis, 1998).

Los cambios en la concentración de ozono a nivel de hemisferio han afectado a la distribución de este contaminante sobre el noroeste de Europa: la producción de ozono a partir de

precursores naturales y antropogénicos en el hemisferio Norte causa que las masas de aire procedentes del océano Atlántico, tradicionalmente limpias, presenten ahora concentraciones de ozono de fondo apreciables (Lelieveld et al, 2004). Esta es la razón que explica la existencia invariable de niveles de ozono en la mayor parte de pueblos y ciudades de ozono durante casi todo el año: las concentraciones de fondo en la estación rural de Mace Head, en Irlanda, se incrementaron 0.14 ppb de 1987 a 1997, mientras desde el año 2000, estos niveles han permanecido constantes (Derwent et al., 2007). Una tendencia similar se ha observado en las masas de aire limpio que, procedentes del océano Pacífico, entran en el continente norteamericano (Jaffe y Ray, 2007). Los datos también apuntan hacia mayores concentraciones de ozono en el hemisferio norte que en el hemisferio sur, lo cual coincide con una mayor influencia del ozono estratosférico en el hemisferio norte y con las mayores emisiones de  $\text{NO}_x$  en el norte desarrollado, que conllevan una producción fotoquímica superior. Por contra, la quema de biomasa, una de las principales fuentes de hidrocarburos no metánicos y  $\text{NO}$ , es una de las fuentes de ozono predominantes en el hemisferio sur (Seinfeld y Pandis, 1998).

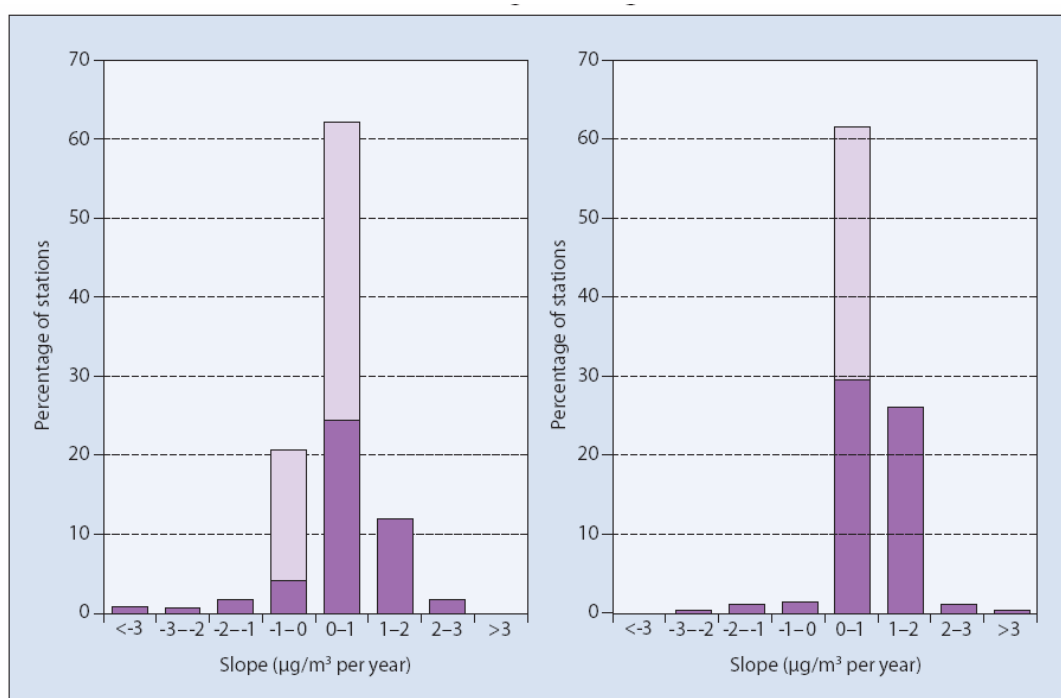


Figura 1.3: “Promedio anual de la media de las concentraciones octohorarias máximas observadas en estaciones europeas de fondo rurales (izquierda) y urbanas-suburbanas (dcha.) durante el período de 1997-2006. Las barras de color más oscuro hacen referencia a tendencias estadísticamente significativas a un nivel del 10%, mientras las barras más claras se refieren a estaciones sin una tendencia significativa. Se observan tendencias ascendentes en la gran mayoría de estaciones urbanas, mientras que el ascenso en las estaciones rurales es ligeramente inferior. Adaptado de Amann et al., 2008”

En Europa, los niveles de ozono en áreas rurales provienen fundamentalmente de las medidas de la red EMEP. En el Reino Unido se estima que las concentraciones máximas de ozono en las estaciones EMEP de fondo han disminuido alrededor de un 30% en el período 1986-1999 (National Expert Group on Transboundary Air Pollution, 2001), pero al mismo tiempo se ha observado un ligero aumento en la concentración media anual. Tomando como base las tendencias observadas en la concentración de COVs y la modelización del potencial de formación de ozono que presenta cada especie de COVs, Derwent et al. (2003) concluyeron que la tendencia descendente en los máximos episódicos de ozono en el noroeste de Europa durante los años 90 debería haber alcanzado los  $6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por año, lo cual está próximo a las reducciones observadas en las Islas Británicas, en torno a los  $3.8\text{-}5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de reducción anual. Resultados similares que también muestran un descenso de la frecuencia de los niveles altos de ozono durante los años 90 se han obtenido también para los países nórdicos,

posiblemente debido a la reducción de emisiones europeas durante este período (Solberg et al., 2005b). A pesar de estos análisis, la red de estaciones EMEP de fondo no muestra tendencias consistentes en los valores máximos de ozono a lo largo de Europa en el período 1990-2006, debido posiblemente a la compensación del balance general de ozono por tres influencias contrapuestas sobre los niveles de ozono en estaciones rurales: el descenso de la intensidad de los episodios de contaminación regional por ozono, la disminución de la retirada de ozono por la reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> procedentes del tráfico y otras fuentes y el crecimiento del nivel de fondo de ozono global o hemisférico. A esta circunstancia hay que añadir las variaciones climáticas en períodos largos, que conducirían a un cambio positivo o negativo en las concentraciones de ozono, todavía sin cuantificar (Amann et al., 2008).

Por el contrario, los niveles urbanos de ozono han aumentado debido al cambio de los patrones de las emisiones de tráfico, con eventos de reducción de ozono menos severos durante el invierno y disminución de los niveles máximos episódicos durante la época estival, de acuerdo con la caída de las emisiones de NO<sub>x</sub> provocadas por el tráfico (figura 1.3). Esto ha supuesto un acercamiento de las concentraciones de ozono registradas en las áreas urbanas a las medidas en zonas suburbanas y rurales próximas.

La presencia de ozono troposférico se atribuye a una combinación de su producción y destrucción fotoquímica de carácter local-regional, acopladas con incursiones regulares de aire estratosférico rico en ozono. Al ser el ozono una especie traza atmosférica, pequeños cambios naturales o antropogénicos en la emisión de sustancias químicas pueden causar alteraciones en la química atmosférica, las cuales, a su vez, redundan en un efecto significativo en las concentraciones atmosféricas de ozono. A pesar de reducciones locales, como las comentadas anteriormente en áreas europeas, el importante crecimiento mundial de la agricultura, el transporte y la industria están causando un importante aumento de las emisiones de gases contaminantes, particularmente óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles, que se acumulan en la atmósfera aumentando la producción fotoquímica global de ozono.

#### 1.1.2 Regulación legislativa de la inmisión de ozono

El incremento de las concentraciones de ozono troposférico, sobre todo en áreas urbanas y suburbanas, provoca daños en los seres vivos y en algunos materiales. Estos riesgos potenciales del ozono a nivel toxicológico y epidemiológico han provocado que la inmisión de ozono esté regulada por la legislación mundial y europea, que pretende establecer una serie de niveles umbral que no se deben superar para evitar posibles alteraciones medioambientales y de la salud humana.

En Europa, el marco legislativo actual relativo al ozono troposférico se articula en torno a la reciente Directiva 2008/50/EC, del 21 de Mayo de 2008, “relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa” (European Union, 2008), que establece valores límite para varios contaminantes, entre ellos el ozono (tablas 1.1 y 1.2). Esta directiva deroga y sustituye a varias directivas previas, en concreto a la Directiva 2002/3/CE, sobre el ozono en el aire ambiente (European Union, 2002).

Umbrales de información y alerta para el ozono		
Objeto	Período medio	Umbral
Información	1 hora	180 µg/m <sup>3</sup>
Alerta	1 hora	240 µg/m <sup>3</sup>

Tabla 1.1: Umbrales de información y alerta para el ozono en el aire ambiente, establecidos por la Directiva 2008/50/CE, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Adaptado de European Union, 2008.

Valores objetivo para el ozono		
Objetivo	Período de promedio	Valor objetivo
Protección de la salud humana	Máxima diaria de medias móviles octohorarias	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (máximo de 25 días de superación por año civil en un período de tres años)
Protección de la vegetación	Mayo a Julio	AOT40 (calculada a partir de valores horarios) 18000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ promediados en período de 5 años

Tabla 1.2: Valores objetivo del ozono en el aire ambiente, establecidos por la Directiva 2008/50/CE, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. AOT40 (expresado en  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ) significa la suma de las diferencias entre las concentraciones horarias superiores a 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (40 partes por mil millones) y 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante un periodo determinado, utilizando unicamente los valores horarios medidos diariamente entre las 8:00 y las 20:00, hora central europea. Adaptado de European Union, 2008.

Esta nueva directiva aún no ha sido traspuesta al ordenamiento jurídico español, ya que el plazo para ello finaliza el 10/06/2010. Por tanto, la legislación aplicable en España a día de hoy referente al ozono atmosférico es el Real Decreto 1796/2003, “relativo al ozono en el aire ambiente” (Ministerio de la Presidencia, 2004). Sin embargo, los umbrales para el ozono coinciden con los establecidos por la Directiva 2008/50/EC, ya que no se han modificado con respecto a la antigua Directiva 2002/3/CE.

## 1.2 Generación de ozono troposférico

Las grandes cantidades de compuestos químicos emitidos a la atmósfera, resultado de las actividades antropogénicas y biogénicas, conducen a un complejo espectro de procesos químicos y físicos que provocan cambios en la composición atmosférica, como son la deposición ácida, el transporte a larga distancia de sustancias químicas, la destrucción del ozono estratosférico, la acumulación de gases de efecto invernadero y por supuesto la contaminación fotoquímica del aire, incluyendo la formación de ozono en masas de aire, tanto rurales como urbanas y suburbanas.

El ozono forma parte de los contaminantes secundarios, ya que no se emite directamente a la atmósfera, sino que se forma a partir de contaminantes primarios (precursores) mediante reacciones provocadas por la luz solar (figura 1.4). El ozono puede considerarse uno de los principales productos de la química troposférica, originándose a partir de una única reacción en la atmósfera, entre el oxígeno molecular y el oxígeno atómico. Prácticamente las únicas longitudes de onda de la radiación solar que alcanzan la troposfera son aquellas superiores a 290 nm, de modo que la fuente de ozono atómico en la troposfera no puede ser el  $\text{O}_2$ , el cual absorbe y se fotodisocia con radiaciones de longitudes de onda más cortas que 290 nm. Esa fuente de oxígeno atómico es proporcionada por el dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , de modo que los óxidos de nitrógeno representan el papel principal en la química troposférica del ozono.

Uno de los principales riesgos de la acumulación de ozono troposférico es el denominado “smog” fotoquímico, fenómeno consistente en la emisión y acumulación de precursores y el posterior desarrollo de reacciones fotoquímicas necesarias para la formación de ozono. La producción fotoquímica de ozono es un paso crítico en un episodio de smog fotoquímico, puesto que el resto de reacciones químicas que ocurren deben su origen o su importancia a la producción de ozono. El término “smog” procede de la combinación de las palabras inglesas *smoke* (humo) y *fog* (niebla), aplicándose inicialmente este término a los episodios de niebla contaminada que ocurrían en Londres, y que se caracterizaban por una niebla densa que contenía partículas de polvo y dióxido de azufre. Este tipo de smog era característico del invierno, como resultado de la acumulación de los productos resultantes de la combustión de los combustibles fósiles en las calefacciones de los hogares, en la industria y en las centrales eléctricas, bajo condiciones meteorológicas adversas. Por su parte, la principal característica

del smog fotoquímico es su elevada concentración en oxidantes, sobre todo ozono y compuestos peróxidos, producidos por las reacciones fotoquímicas, que sólo se desarrollan en presencia de luz solar.

Los episodios de smog fotoquímico constituyen la principal vía de producción de ozono troposférico: la manifestación más obvia del smog es la formación de una neblina de un color amarillento-gris-parduzca, aerosol de baja humedad, que es debida a la presencia en el aire de pequeñas gotas de agua que contienen productos de reacciones químicas, las cuales tienen lugar entre los contaminantes del aire. Los productos intermedios y finales de las reacciones en el smog pueden afectar a la salud humana y causar daño a las plantas, animales y algunos materiales (Baird, 2001).

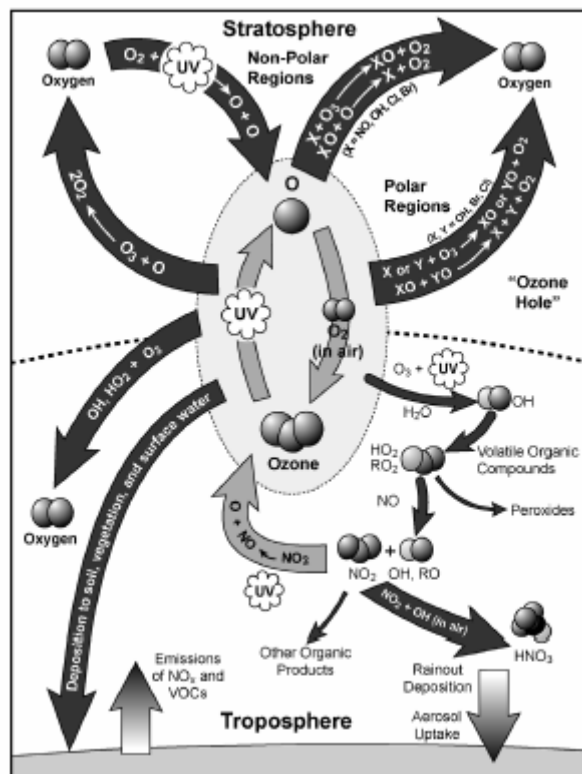
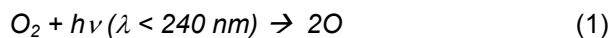


Figura 1.4: "Esquema de los mecanismos de generación y destrucción fotoquímica del ozono en la estratosfera y la troposfera. Fuente: United States Environmental Protection Agency, 2006b"

Su origen son procesos fotoquímicos en los que intervienen los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos emitidos por fuentes muy variadas, tanto de carácter antropogénico (tráfico, procesos de combustión y otras actividades industriales, como las industrias petroquímicas, etc.) o biogénico, como la vegetación o los volcanes. Muchas áreas urbanas y áreas rurales cercanas a las grandes metrópolis sufren episodios de smog fotoquímico, durante los cuales se producen elevados niveles de ozono a nivel del suelo, como resultado de reacciones inducidas por la luz entre los contaminantes primarios. El proceso de formación de smog fotoquímico involucra centenares de reacciones diferentes, que a su vez implican docenas de compuestos químicos actuando simultáneamente.

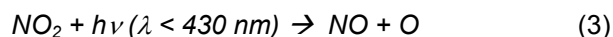
### 1.2.1 Mecanismos químicos de formación y destrucción de ozono

La producción de ozono en la estratosfera se debe a la fotodisociación de una molécula de oxígeno para dar oxígeno atómico. Éste se combina posteriormente con el oxígeno molecular para dar ozono:



La reacción (2) es tan exotérmica que requiere la presencia de otro elemento (M), como  $N_2$  u  $O_2$ , que elimina la energía y estabiliza la molécula de ozono.

Sin embargo, en la troposfera, donde sólo están presentes radiaciones de longitud de onda superior a 280 - 290 nm, la producción significativa de oxígeno atómico proviene de la fotólisis del  $NO_2$  según la reacción (3).



Su disociación por la radiación solar en el ultravioleta cercano es un proceso clave en la formación de oxígeno atómico troposférico, para reaccionar posteriormente con el oxígeno molecular formando ozono, de acuerdo con la reacción (4):



En ausencia de otras reacciones competitivas, la rápida reacción del NO con el  $O_3$  completa el ciclo, regenerando una molécula de  $NO_2$  según la reacción (5):



Las tres reacciones (3, 4 y 5) ocurren rápidamente, estableciéndose una concentración de ozono dada por la relación de un estado fotoestacionario, según la expresión (6), de modo que la concentración de ozono dependerá de la relación  $NO_2/NO$  y del valor de la relación  $k$ , cociente de las velocidades específicas características de las reacciones (3) y (4), y que a su vez depende de la radiación solar:

$$[O_3] = k \frac{[NO_2]}{[NO]}, \quad k = \frac{k_{(3)}}{k_{(4)}} \quad (6)$$

En ausencia de otros agentes oxidantes, el ozono oxidará al NO para regenerar al  $NO_2$  sin resultar ganancia neta de ozono. Sólo puede existir acumulación de ozono si existe un paso alternativo que evite el consumo a través de la reacción (5). Esta alternativa viene dada por diversas reacciones químicas que tienen lugar por la presencia de contaminantes atmosféricos y son inducidas por la luz solar, dando lugar a la formación de ozono y otros oxidantes fotoquímicos como contaminantes secundarios. A principios de los años 50, Haagen-Smith propuso que el ozono y otros componentes del smog fotoquímico observados en áreas urbanas podían formarse en la atmósfera como resultado de reacciones fotoquímicas en las que intervenían contaminantes primarios o precursores como el  $NO_x$  y los hidrocarburos no metánicos (NMHC), que son compuestos orgánicos volátiles reactivos típicos en los gases de escape de los automóviles y en las emisiones de fuentes estacionarias.

## Formación neta de ozono troposférico

Existen tres mecanismos básicos de reacción fotoquímicos en los que intervienen los  $\text{NO}_x$  para producir ozono en la atmósfera, basados en la oxidación de los hidrocarburos no metánicos (NMHC), en concreto los compuestos orgánicos volátiles (COVs), del monóxido de carbono CO y del metano  $\text{CH}_4$ . Todos estos mecanismos de reacción se inician con el oxidante primario hidroxilo OH y en todos los casos los mecanismos son catalíticos respecto al  $\text{NO}_x$ , produciéndose interconversión de NO a  $\text{NO}_2$  sin pérdida de  $\text{NO}_x$ . Sin embargo, el monóxido de carbono CO, el metano  $\text{CH}_4$  y los compuestos orgánicos volátiles COVs se consumen en la reacciones, considerándose por ello el combustible de la reacción.

En consecuencia, el dominio de uno u otro mecanismo de reacción en la atmósfera depende de la abundancia de estos combustibles reactivos:

- los mecanismos de formación de ozono troposférico en la troposfera libre y en la capa oceánica, donde las concentraciones de COVs son relativamente bajas, se rige por la oxidación del  $\text{CH}_4$  y, sobre todo, del CO, ya que aunque éste último presenta concentraciones inferiores, su velocidad de reacción es muy superior
- en la capa límite las concentraciones de hidrocarburos son mucho mayores que en las capas superiores de la atmósfera, de modo que el mecanismo principal para la formación de ozono troposféricos será la oxidación de COVs

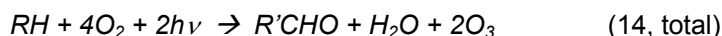
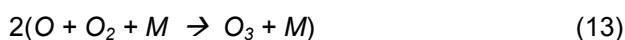
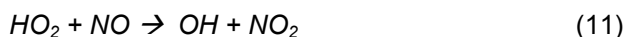
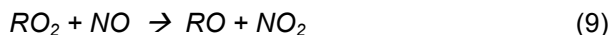
Este proceso en la capa límite presenta velocidades de producción y destrucción de ozono muy elevadas, debido a la alta concentración de COVs, y a que la variedad y concentración de radicales peroxi ( $\text{RO}_2$ ) y las concentraciones de  $\text{NO}_x$  son mayores en la superficie. Además, la producción de COVs secundarios durante los procesos de oxidación y su posterior degradación puede contribuir a la formación de nuevas moléculas de ozono. Sin embargo, las especies que destruyen ozono son también más abundantes, como los hidrocarburos insaturados que reaccionan directamente con el ozono, contribuyendo a que las velocidades de destrucción del ozono sean también superiores.

A continuación se describen los tres mecanismos fotoquímicos básicos citados anteriormente para la producción de ozono en la troposfera, basados en la oxidación de hidrocarburos no metánicos, de CO y de  $\text{CH}_4$  (Baird, 2001).

### a) Oxidación de hidrocarburos no metánicos

La producción de ozono a través de la oxidación de COVs se puede realizar de diferente modo, dependiendo de si estos hidrocarburos presentan o no mayoría de dobles enlaces (alquenos).

El mecanismo principal de formación de ozono en un episodio de smog fotoquímico es el siguiente:



En las reacciones anteriores, a efectos de simplificación, la abreviatura RH hace referencia a los hidrocarburos no metánicos, donde R puede ser  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5$ , etc. y los productos carbonilos (aldehídos y cetonas) se abrevian como  $\text{R}'\text{CHO}$ , siendo  $\text{R}'$  una cadena carbonada orgánica que contiene un átomo de carbono menos que R.

El mecanismo se inicia por la acción del radical libre OH, que sustrae un hidrógeno al hidrocarburo (7), pues este radical libre OH, con un electrón desapareado, es una especie muy reactiva. La captura de un átomo de hidrógeno rompe el enlace covalente en el hidrocarburo RH, creando otro radical libre R, que en presencia de oxígeno forma radicales oxigenados (8). El radical peroxi  $\text{RO}_2$  oxida el NO a  $\text{NO}_2$ , formando el radical RO (9), que en presencia de oxígeno produce un aldehído  $\text{R}'\text{CHO}$  y un nuevo radical, el hidroperóxido  $\text{HO}_2$  (10), que oxida otra molécula de NO a  $\text{NO}_2$  (11).

Una vez el NO se ha oxidado a  $\text{NO}_2$  (9, 11), la descomposición fotoquímica de este último por medio de la luz solar forma NO y oxígeno atómico O (12), y éste rápidamente se combina con el oxígeno molecular  $\text{O}_2$  para dar ozono (13).

El dióxido de nitrógeno es la única fuente significativa de oxígeno atómico a partir de la cual se puede formar el ozono. La concentración de ozono debido a esta secuencia de reacciones no se incrementa de modo significativo hasta que casi todo el NO se haya convertido a  $\text{NO}_2$ , puesto que el NO y el  $\text{O}_3$  se destruyen mutuamente si ambos están presentes en concentraciones significativas (5).

Sólo después de que la mayor parte del NO haya sido oxidada a  $\text{NO}_2$  como resultado de las reacciones con los radicales libres peroxi  $\text{RO}_2$  no ocurre la característica acumulación de ozono troposférico. La reacción de los radicales peroxi ( $\text{CH}_3\text{O}_2$  y  $\text{HO}_2$ ) pueden oxidar el NO a  $\text{NO}_2$  sin consumir ozono, compitiendo con la reacción del NO con el ozono para dar  $\text{NO}_2$ . Cuando intervienen estas reacciones, hay producción neta de ozono sin que se elimine éste.

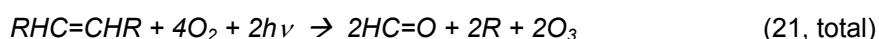
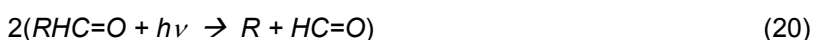
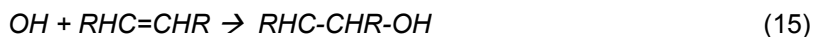
El resultado neto de todo el conjunto de reacciones es la formación de dos moléculas de ozono y un aldehído  $\text{R}'\text{CHO}$ . Los compuestos carbonilos formados pueden sufrir más reacciones fotoquímicas que revertirán en una mayor producción de radicales orgánicos y radicales hidroxilos, que a su vez producirán mayores cantidades de ozono. El número de moléculas de  $\text{O}_3$  por hidrocarburo dependerá de su estructura y de la composición atmosférica: para las especies encontradas en el aire ambiente conteniendo de 2 a 6 átomos de carbono, cada molécula puede generar de 4 a 14 moléculas de ozono.

Se demuestra de este modo que los hidrocarburos no metánicos NMHC y los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$  son los precursores mayoritarios del ozono troposférico. Debe reseñarse que el  $\text{NO}_x$  desempeña el papel de catalizador en la secuencia de reacciones indicada, mientras que los compuestos orgánicos se consumen, siendo eventualmente oxidados a  $\text{CO}_2$ . No obstante, hay reacciones simultáneas en la atmósfera que consumen  $\text{NO}_x$  transformándolo en ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  o en nitratos, los cuales se eliminan de la atmósfera a través de la deposición seca y húmeda.

El proceso general comentado anteriormente varía ligeramente en su reacción inicial para el caso de hidrocarburos que contienen enlaces dobles. En lugar de reaccionar el radical hidroxilo sustrayendo un hidrógeno del hidrocarburo (7), se produce una adición del hidroxilo al enlace doble (15). Esta reacción de adición es un proceso más rápido, ya que posee una energía de activación más baja que la reacción alternativa de abstracción de hidrógeno. Por esta razón, los hidrocarburos  $\text{RHC=CHR}$  reaccionan en general más rápidamente que los alcanos para formar ozono. El segundo paso consiste en que los radicales a base de carbono, producidos a partir de la reacción del radical hidroxilo con el hidrocarburo, adicionen  $\text{O}_2$  para dar un radical peroxi  $\text{RO}_2$  (16), el cual a su vez oxida al NO para dar  $\text{NO}_2$  (17). El radical de dos carbonos  $\text{ORHC-CHROH}$  se descompone espontáneamente por rotura del enlace C-C para dar una molécula no radicalaria que contiene un enlace  $\text{C=O}$ , un aldehído y otro radical  $\text{RHCOH}$  (18). El radical basado en el carbono  $\text{RHCOH}$  producido en la reacción anterior reacciona después con una molécula de  $\text{O}_2$ , que elimina un átomo de hidrógeno, lo cual permite que el enlace C-O se transforme en un enlace  $\text{C=O}$ , generándose de nuevo un aldehído. De este modo, la molécula original de contaminante  $\text{RHC=CHR}$  se transforma en dos moléculas de aldehído, cada una de

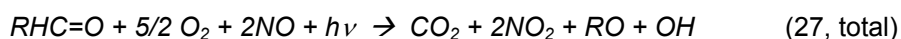
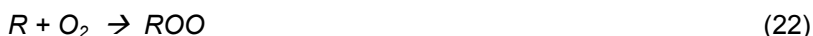


ellas con la mitad del número de átomos de carbono: la mayor parte de los reactivos hidrocarbonados emitidos al medio aéreo en las horas punta de tráfico se convierten en aldehídos, mientras a media tarde la mayoría de los aldehídos desaparecen, al fotodescomponerse para dar radicales libres HCO y radicales alquilos R (19).



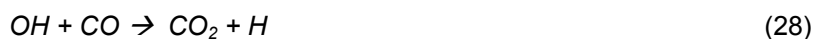
La descomposición de los aldehídos y el ozono inducida por la luz solar conduce a un enorme aumento del número de radicales libres en el aire de una ciudad que sufre el proceso de smog fotoquímico, aunque en términos absolutos la concentración de radicales es muy pequeña. La molécula original RHC=CHR presenta varias etapas de conversión a aldehído y luego de éste a CO<sub>2</sub>, de modo que el efecto neto de la oxidación sinérgica del óxido nítrico y el RHC=CHR es la producción de CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y más radicales hidroxilo. Así pues, la reacción es autocatalítica y su velocidad neta se incrementa con el tiempo, ya que uno de sus productos, el OH, cataliza la reacción de otras moléculas reactivas (Baird, 2001).

El mecanismo de la oxidación de los aldehídos se muestra a continuación:



b) Oxidación del monóxido de carbono

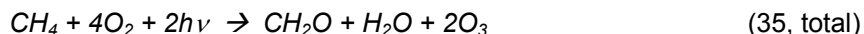
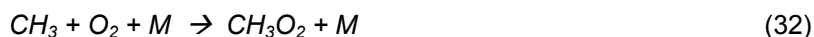
La producción de ozono troposférico a partir de monóxido de carbono no es tan importante como las anteriores descritas hasta el momento, pero también se ha de tener en consideración, siendo su mecanismo de reacción de la forma siguiente:



En este caso, el monóxido de carbono CO se consume para formar dióxido de carbono CO<sub>2</sub> y ozono O<sub>3</sub>. Puesto que el CO se encuentra fácilmente en la atmósfera, generalmente es el NO<sub>x</sub> el precursor del ozono que se comporta como reactivo limitante para su formación. Esto también sucede para el metano (Brasseur et al., 2003).

c) Oxidación del metano

La producción de ozono troposférico a partir de metano es un proceso con una velocidad de reacción muy reducida. El mecanismo de oxidación del metano se describe a continuación:



El metano se oxida a formaldehído (CH<sub>2</sub>O), agua y ozono. La formación de dos radicales peroxi (CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub> y HO<sub>2</sub>) permite la aparición de dos moléculas de ozono. La oxidación del formaldehído por los radicales hidroxilo (OH) o la fotólisis puede llevar a una producción de ozono en presencia de NO<sub>x</sub> (Baird, 2001).

## Destrucción de ozono troposférico

La destrucción química del ozono presenta a su vez dos vías principales, la reacción química con oxidantes y la fotólisis, descritas a continuación:

### a) Reacción química con oxidantes

A muy bajas concentraciones o en ausencia de  $\text{NO}_x$  no se forma ozono por ninguno de los mecanismos previamente expuestos, pues las reacciones de los radicales compiten con las siguientes reacciones:



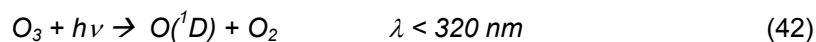
Estas reacciones interconvierten las especies  $\text{HO}_x$  y conducen a una pérdida catalítica de ozono. En ausencia de  $\text{NO}_x$ , la oxidación del CO puede llevar a un proceso eficiente de destrucción del ozono a través de las siguientes reacciones:



Debe indicarse que si el  $\text{HO}_2$  reacciona con otro radical peroxi en lugar de reaccionar con el ozono, entonces no se producirían cambios en la concentración de ozono.

### b) Fotólisis

Otro mecanismo importante de destrucción de ozono es la fotólisis, siendo éste el proceso predominante en las regiones remotas a baja altitud, donde la concentración de agua aun puede ser importante. El mecanismo de reacción, que da como producto el radical hidroxil OH es el que sigue:



Muchos de los átomos electrónicamente excitados  $\text{O}(^1D)$  se convierten a átomos de oxígeno no excitados, los cuales llevan a una recombinación inmediata para volver a formar ozono, pero unos pocos de los átomos excitados reaccionan con el vapor de agua para producir radicales hidroxil OH.

### 1.2.2 Precursores de ozono y sus focos emisores

El ozono es un contaminante secundario producido a partir de precursores emitidos por actividades humanas y naturales, que en presencia de luz solar dan lugar a su formación mediante las reacciones fotoquímicas analizadas previamente.

Entre estos precursores se encuentran los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) como compuestos principales, emitidos por actividades humanas (industria, tráfico, etc.) y naturales (tormentas, vegetación, etc.), mientras el monóxido de carbono (CO) y el metano ( $\text{CH}_4$ ) se consideran precursores minoritarios, debido a que intervienen en la formación de ozono en la troposfera libre y en la lejana capa límite oceánica.

#### a) Óxidos de nitrógeno

El término  $\text{NO}_x$  hace referencia a la mezcla de los óxidos NO y  $\text{NO}_2$ , producidos en todo proceso de combustión por conversión del nitrógeno libre del aire o del combinado en el propio combustible. En estos gases de combustión el NO representa alrededor del 90-95% de la mezcla.

Se considera que la mayor parte de óxidos de nitrógeno atmosféricos son de origen natural, producidos a partir de incendios forestales, procesos anaeróbicos en el suelo y descargas eléctricas en las tormentas. Las fuentes antropogénicas más relevantes son, principalmente, los procesos industriales de combustión a altas temperaturas y el tráfico.

La producción de ozono es muy sensible a la concentración de  $\text{NO}_x$ , ya que con altas concentraciones de  $\text{NO}_x$  la producción será ineficiente, y nula con muy pequeñas concentraciones de  $\text{NO}_x$ . En condiciones en que la concentración de  $\text{NO}_x$  es muy elevada, el ozono producido puede ser destruido por éstos según la reacción (5)



en la que se considera que el  $\text{NO}_2$  se pierde o se transforma en otros reservorios compitiendo con la reacción de fotólisis del  $\text{NO}_2$ , que llevaría a la formación de átomos de oxígeno, y consecuentemente a la producción de ozono según las reacciones (3) y (4)



En ausencia de  $\text{NO}_x$ , los procesos de oxidación fotoquímica llevan a la destrucción del ozono, de modo que sin  $\text{NO}_x$  no habría o bien se reduciría considerablemente la producción fotoquímica de ozono en la troposfera.

#### b) Compuestos orgánicos volátiles

Las propiedades más relevantes de un compuesto orgánico como precursor del ozono son su volatilidad, que gobierna su dispersión en la atmósfera, y su reactividad, que determina su vida media en dicha atmósfera. Debe señalarse que, entre los hidrocarburos, el metano es clasificado como no reactivo por su reactividad despreciable en condiciones ambientales, y contribuye de forma mínima a la producción de ozono en episodios de corta duración.

Además de los hidrocarburos, otros compuestos orgánicos fotoquímicamente reactivos, tales como éteres, alcoholes, cetonas y aldehídos, también pueden actuar como precursores del ozono en procesos atmosféricos. Por esta razón, los compuestos importantes como precursores suelen ser referidos como hidrocarburos no metánicos (NMHC), compuestos orgánicos no metánicos (NMOC) o simplemente compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Estos términos distinguen una amplia clase de precursores orgánicos provenientes de actividades humanas, como las emisiones de motores y fuentes estacionarias, la evaporación de combustibles y diversos solventes, industria química y refino de petróleo. En las grandes aglomeraciones urbanas estas fuentes antropogénicas representan la mayoría de los precursores, pero en atmósferas rurales las emisiones naturales pueden tener un gran impacto, como es el caso de los hidrocarburos biogénicos emitidos por la vegetación, especialmente terpenos e isoprenos, que reciben una considerable atención por su contribución a la formación de ozono.

A igual que los óxidos de nitrógeno, la mayor parte de los hidrocarburos emitidos a la atmósfera son de origen natural, procedentes de emisiones debidas a la vegetación, a los océanos a incendios forestales y a emisiones biogénicas. Las fuentes de origen antropogénico son principalmente emisiones de vehículos, evaporación de disolventes, refinerías, residuos sólidos y emisiones industriales de otros tipos.

Los COVs generados por la naturaleza son generalmente hidrocarburos, aunque también se emiten de forma natural pequeñas cantidades de compuestos orgánicos volátiles parcialmente oxidados como pueden ser alcoholes, aldehídos, cetonas y ácidos. Estos compuestos pueden ser el resultado de la oxidación in situ de los hidrocarburos emitidos. Entre los hidrocarburos emitidos biogénicamente, el metano es el más abundante. Sin embargo, los hidrocarburos no metánicos y los COVs parcialmente oxidados son mucho más reactivos en la atmósfera que el metano, a pesar de que sus concentraciones individuales en la atmósfera sean muy inferiores.

#### c) Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas producto de la combustión incompleta de sustancias orgánicas, constituyendo el contaminante más abundante en la capa más baja de la atmósfera, sobre todo en el entorno de las grandes ciudades.

Su procedencia en la atmósfera es de origen natural en su mayor parte, proviniendo de la oxidación del metano en reacciones fotoquímicas y de los océanos, y se elimina de la atmósfera por reacciones de oxidación a  $\text{CO}_2$ . Las principales fuentes antropogénicas de CO son el transporte, seguido a considerable distancia por procesos industriales como la producción de aceros y el refino de petróleo.

#### d) Metano

El metano es el hidrocarburo atmosférico más abundante, con una vida media en la troposfera de 5 a 10 años, y se emite principalmente por fuentes naturales: procesos biológicos de degradación de la materia orgánica, reacciones anaeróbicas del metabolismo, emisión de metano de los océanos y humedales, etc. Estas fuentes naturales son más importantes que las antropogénicas, constituidas sobre todo por escapes y emisiones incontroladas o accidentales, combustión de biomasa, actividades agropecuarias, extracciones de combustibles como el gas natural y emisiones de residuos sólidos.

### **1.3 Transporte y mezcla de ozono troposférico**

En el apartado previo se describió la generación y destrucción fotoquímica de ozono troposférico, pero la abundancia y distribución de ozono en la atmósfera está determinada por interacciones complejas entre la meteorología y la química de los compuestos presentes en la atmósfera. En este apartado se analizan algunos de los fenómenos meteorológicos más relevantes en relación con las concentraciones de inmisión de ozono troposférico, como las intrusiones de ozono estratosférico, las corrientes de chorro en niveles bajos durante la noche o las circulaciones de pequeña escala, como las brisas marinas.

### 1.3.1 Mezcla e intercambio en la capa límite planetaria

Los contaminantes se emiten y se depositan en la capa límite planetaria, siendo transportados desde la superficie hacia la troposfera libre, de modo que la mezcla en la capa límite y el intercambio con la troposfera libre son dos de los procesos más importantes en la formación y desaparición de fotooxidantes.

La capa límite planetaria puede definirse como la parte más baja de la troposfera, afectada directamente por la presencia de la superficie terrestre (Stull, 1988). En ausencia de procesos convectivos o circulaciones locales, las variaciones diurnas de la altura de esta capa límite están ligadas a la superficie. Sobre el mar el ciclo diurno es pequeño, porque las temperaturas de la superficie marina varían sólo ligeramente: la altura de la capa límite durante el mediodía, cuando el calentamiento es máximo, es escasamente superior a la existente durante la noche. Este ciclo es mucho más pronunciado sobre tierra, donde el contraste térmico día-noche es mucho mayor. Si se considera una situación anticiclónica, durante el día se forma una capa convectiva con un gran nivel de mezcla, alcanzando su máxima profundidad al mediodía. En ese período, el aire procedente de estratos superiores puede entrar por la parte de arriba de esta capa e incluso se pueden formar nubes en su cima. Hacia el anochecer, la capa límite se colapsa, para desarrollar una capa nocturna bastante estable, permaneciendo inicialmente el aire mezclado en una capa residual justo por encima.

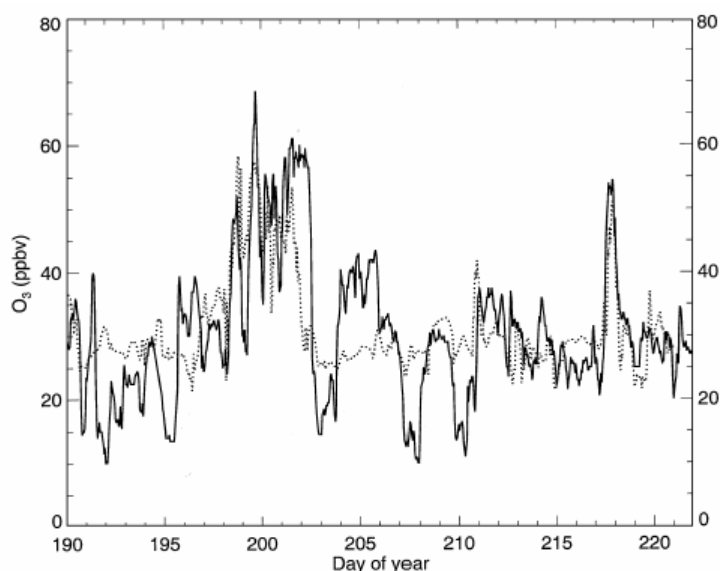


Figura 1.5: “Comparación de los niveles de ozono calculados y simulados durante el experimento ACSOE (Atmospheric Chemistry Studies in the Ocean Environment) en Mace Head (Irlanda) en Julio de 1996. Se observa la persistencia de elevados niveles de ozono en los días julianos 198-203. Fuente: Evans et al. 2000”

En la parte superior de la capa límite existe una zona estable de entrada en la cual el aire puede mezclarse entre la troposfera libre y la capa límite. En ocasiones esta zona llega a ser muy estable y actúa como una inversión de “tapadera”, impidiendo cualquier movimiento de aire entre estas dos regiones. En esta situación, que ocurre a menudo en configuraciones sinópticas de altas presiones, las concentraciones de contaminantes pueden alcanzar niveles muy elevados durante períodos de varios días. Por ejemplo, la figura 1.5 muestra el aumento de ozono sobre la estación de Mace Head, en Irlanda, durante varias jornadas en Julio de 1996, en el que un anticiclón se mantuvo sobre Europa y el viento del este transportó importantes concentraciones de contaminantes hacia las Islas Británicas (Brasseur et al, 2003).

### 1.3.2 Intrusiones de ozono estratosférico

El ozono se produce de forma natural en la estratosfera a través de reacciones fotoquímicas, y parte de este ozono se transporta a lo largo del año hacia la troposfera, con contribuciones mayores durante finales del invierno y principios de la primavera, en un proceso conocido como “plegamiento de la tropopausa” (*tropopause folding*), relacionado con eventos de ciclogénesis. Este transporte de ozono estratosférico hacia niveles inferiores de la atmósfera a través de la tropopausa se denomina proceso de intrusión estratosférica (Danielsen, 1968), durante el cual lenguas de aire estratosférico penetran en la troposfera, generalmente en latitudes extratropicales.

Este aire importado de la troposfera contribuye a los niveles naturales de ozono de fondo en la troposfera, sobre todo en la troposfera libre: los intercambios estratosfera-troposfera son uno de los procesos más importantes que contribuyen al balance total de ozono en la troposfera, modificando la distribución de este gas traza y la química de la baja estratosfera. Actualmente persiste todavía una notable incertidumbre en la magnitud y distribución de esta importante fuente de ozono troposférico. Las estimaciones de la cantidad anual de ozono transportado desde la estratosfera a la troposfera se basan en medidas de trazadores o bien en modelos de circulación general, pero presentan un alto grado de incertidumbre. En el hemisferio norte, los flujos parecen ser mayores durante la primavera, incluso cinco veces superiores a los flujos durante el otoño. Su intensidad ha sido estimada para el hemisferio norte en un rango de  $3\text{--}8 \times 10^{10}$  moléculas  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Crutzen, 1995), mientras en el hemisferio sur alcanzaría la mitad del rango de valores anterior. Se ha estimado que la producción estratosférica de ozono se sitúa sobre las  $5 \times 10^{13}$  moléculas  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , de modo que sólo el 0.1% de todo el  $\text{O}_3$  producido en la estratosfera alcanza la troposfera (Crutzen, 1995). A pesar de estos datos, la pérdida global estimada de  $\text{O}_3$  por fotólisis en la troposfera está en  $14 \times 10^{10}$  moléculas  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , de modo que excede claramente la cantidad de  $\text{O}_3$  procedente del intercambio estratosfera-troposfera (Seinfeld y Pandis, 1998).

Las intrusiones estratosféricas que alcanzan la superficie son raras, siendo más habituales las que penetran sólo hasta la troposfera media y superior. Sin embargo, el ozono transportado a la troposfera media y alta puede afectar a las concentraciones superficiales a través de varios mecanismos de intercambio que mezclan el aire de la troposfera libre con el aire de la capa límite planetaria. La principal producción fotoquímica de ozono en la troposfera también comienza a finales del invierno y principios de la primavera, por lo cual no se puede asumir que el ozono registrado en esos periodos sea sólo de origen estratosférico.

Existen varios mecanismos de inyección de ozono estratosférico en la troposfera, incluyendo “plegamientos de la tropopausa” (Reed, 1955; Danielsen, 1968), depresiones de corte (*cut-off lows*), turbulencia en aire claro, tormentas y procesos convectivos de mesoescala, ondas de gravedad y “estrías” (*streamers*, intrusiones estratosféricas de aire seco visibles en las imágenes de satélite de vapor de agua, con forma de filamento que en ocasiones se enrollan en vórtices y muestran una clara mezcla de aire húmedo subtropical y aire seco polar de naturaleza estratosférica, Wimmers et al., 2003). De todos ellos, el más importante es el “plegamiento de la tropopausa”, que describe el proceso en el cual la tropopausa penetra profundamente en la troposfera a lo largo de una zona frontal en pendiente, trayendo con ella aire de la baja estratosfera (figuras 1.6 y 1.7). Este fenómeno ocurre con la formación de frentes en niveles altos asociados con circulaciones transversales desarrolladas alrededor del núcleo de la corriente polar de chorro. La tropopausa, más alta al sur de la corriente de chorro que al norte, puede imaginarse como un envoltorio alrededor del núcleo del chorro, que se pliega bajo él y se extiende hacia la troposfera. Estos eventos, de gran amplitud espacial (200-1000 km de longitud, 100-300 km de ancho y 1-4 km de alto), tienen lugar a lo largo del año y su localización sigue el desplazamiento de la corriente de chorro polar.

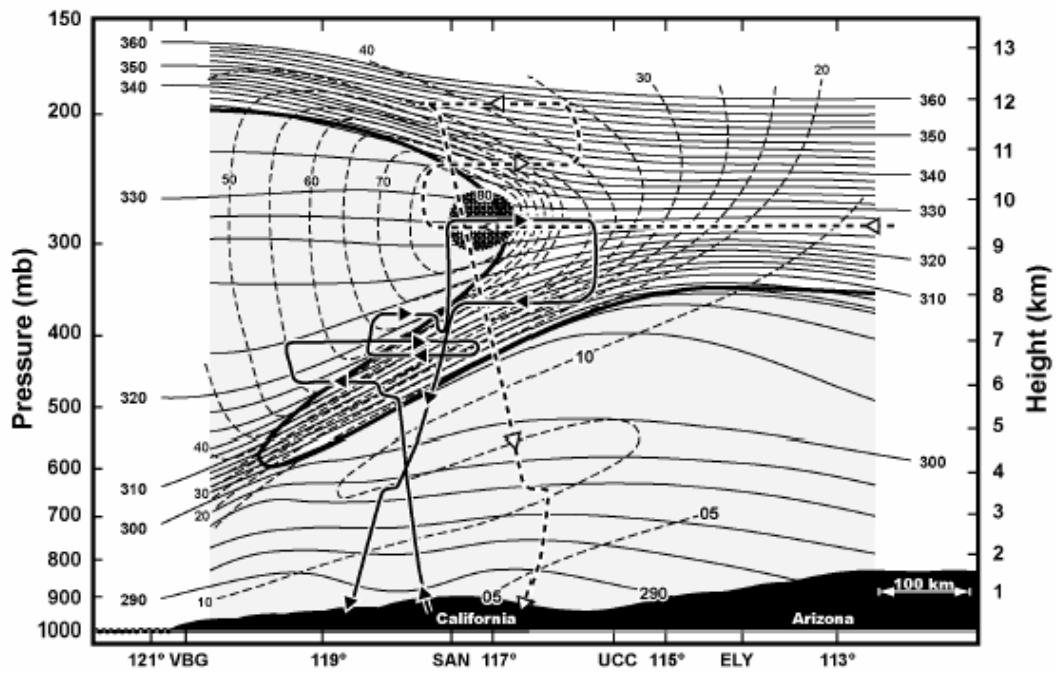


Figura 1.6: “Corte de un evento de “plegamiento de la tropopausa” el 13/03/1978 a las 00 GMT. La temperatura potencial (K) se representa por líneas continuas finas y la velocidad de viento ( $m s^{-1}$ ) por líneas discontinuas. El área sombreada del centro de la figura representa el núcleo de la corriente de chorro. Las tropopausa aparece definida con una línea continua gruesa, mediante una vorticidad de  $100 \times 10^{-7} K mb^{-1} s^{-1}$ . Las líneas con flechas muestran los recorridos de los vuelos de registro de datos, mientras la longitud se representa en el eje horizontal. Adaptado de Shapiro, 1980”

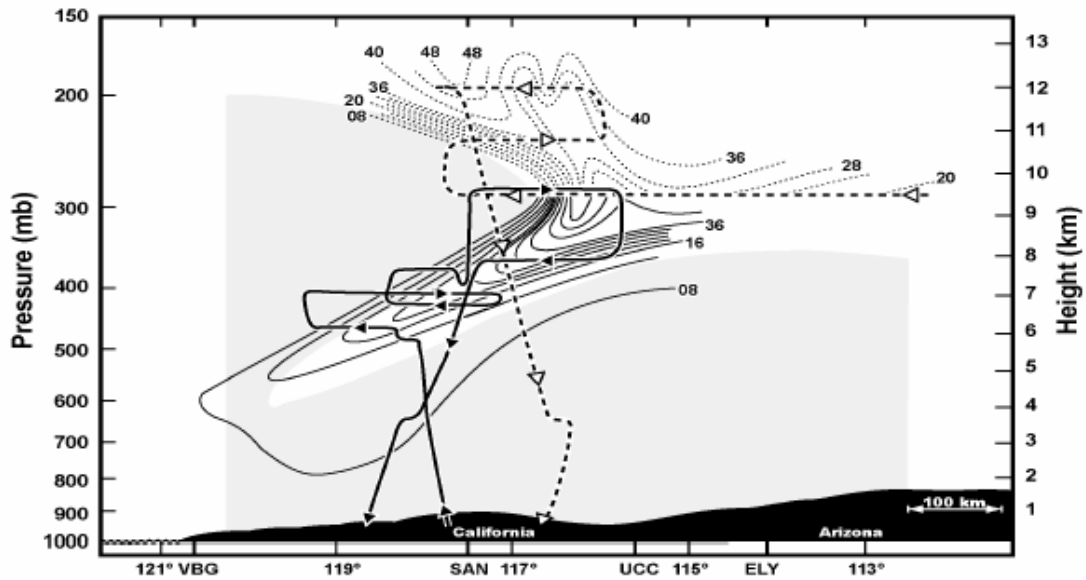


Figura 1.7: “Razón de mezcla del ozono en partes por cien millones (pphm) correspondiente a la figura 1.6. Las líneas con flechas indican los dos vuelos de registro de datos. La longitud se representa en el eje horizontal. Adaptado de Shapiro, 1980”



### 1.3.3 Corriente de chorro en capas bajas durante la noche

Las corrientes en chorro nocturnas en capas bajas (*low level jet*) coinciden con situaciones sinópticas involucradas en importantes episodios de ozono, de modo que podrían desempeñar un papel importante en la formación de elevados niveles de ozono. Estas corrientes pueden transportar contaminantes a cientos de kilómetros de sus fuentes de origen.

La figura 1.8 muestra la evolución de la capa límite planetaria sobre la superficie terrestre cuando domina una situación sinóptica de altas presiones. Durante los patrones sinópticos con un flujo zonal más intenso, el esquema de la capa límite podría ser ligeramente diferente, con una mezcla más uniforme. La capa límite puede considerarse dividida en tres subcapas: una capa de mezcla turbulenta, presente durante las horas diurnas, una capa residual de menor turbulencia dispuesta en el espacio previamente ocupado por la capa de mezcla, y una capa nocturna estable que tiene períodos esporádicos de turbulencia. La corriente en chorro a niveles bajos se forma en la capa residual. Durante la noche, la capa límite suele comprender varias capas delgadas estratificadas con propiedades físico-químicas diferentes (Stull, 1988).

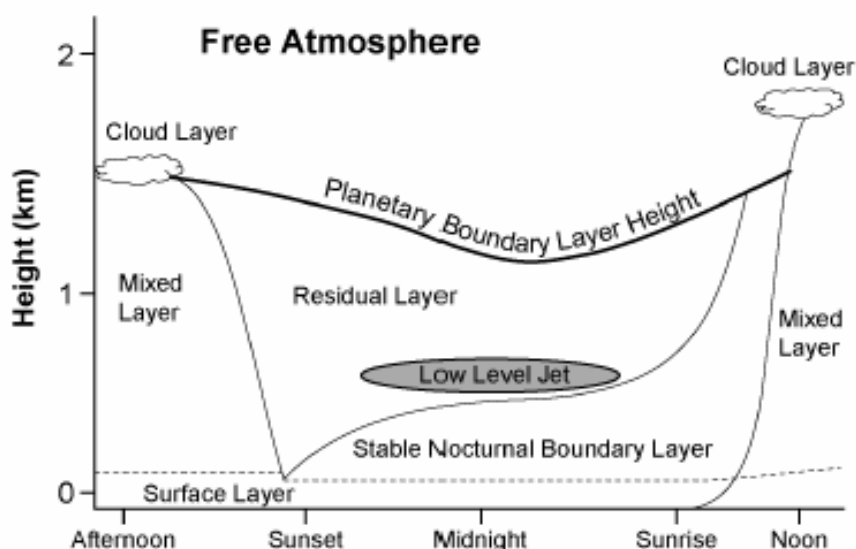


Figura 1.8: "Evolución diurna de la capa límite planetaria bajo una situación sinóptica anticiclónica. Existen tres estratos principales, sin considerar la capa superficial: una capa de mezcla turbulenta, una capa residual con menor turbulencia, que contiene aire previamente situado en la capa de mezcla, y una capa estable nocturna, caracterizada por períodos esporádicos de turbulencia. Fuente: United States Environmental Protection Agency, 2006"

Por la noche, bajo condiciones de calma, la capa límite planetaria estable se estratifica y como resultado, se inhibe la mezcla vertical. Durante las tardes despejadas, la corriente de chorro en capas bajas comienza a formarse tras la puesta de sol. La cuña de aire frío en la capa estable nocturna desacopla la capa superficial de la residual y actúa como una superficie suave permitiendo que el aire que se encuentra justo por encima de ella, en la capa residual, fluya rápidamente sobre la inversión al liberarse de la fricción superficial (Stull, 1988). Cuando sale el sol, la tierra se vuelve a calentar y la atmósfera inferior comienza a mezclarse a medida que asciende el aire caliente. La corriente disminuye a medida que la inversión térmica nocturna se deshace y la fricción superficial reduce la intensidad de viento. Si las condiciones estables persisten, las siguientes noches se volvería a formar esta corriente nocturna con consecuencias similares: el desarrollo de cizallas verticales de viento, que provoca la mezcla entre las capas nocturnas, que de otro modo estarían estratificadas (figura 1.9).

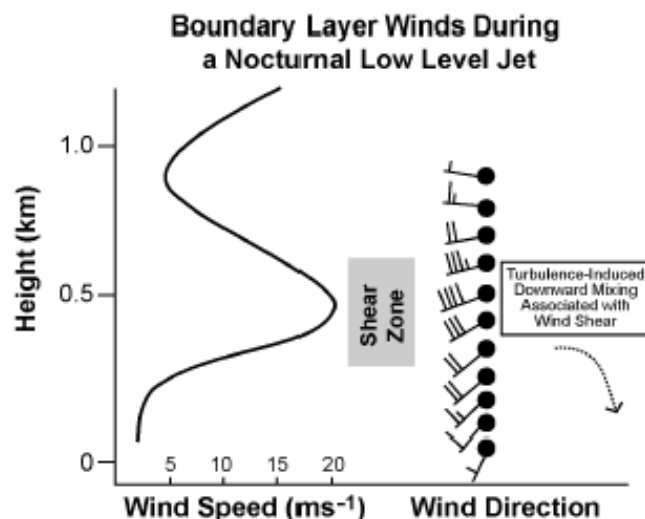


Figura 1.9: “La corriente en chorro a niveles bajos se sitúa durante la noche en una delgada capa de la atmósfera próxima a la superficie terrestre. Los bruscos cambios en altura de la dirección e intensidad del viento asociados al establecimiento de esta corriente crean condiciones favorables para el transporte de aire hacia la capa superficial. Fuente: United States Environmental Protection Agency, 2006b”

Se han descrito varios episodios de ozono relacionados con el desarrollo de estas corrientes de chorro (Corsmeier et al., 1997; Reitebuch et al., 2000; Salmond y McKendry, 2002), que provoca la aparición de un máximo secundario de ozono durante la noche (figura 1.10), debido al transporte vertical de ozono procedente de la capa residual superior. Estos máximos secundarios, en promedio, no superan el 10% de los máximos absolutos diurnos, pero en ocasiones pueden superar el 80% del máximo absoluto diario (Salmond y McKendry, 2002).

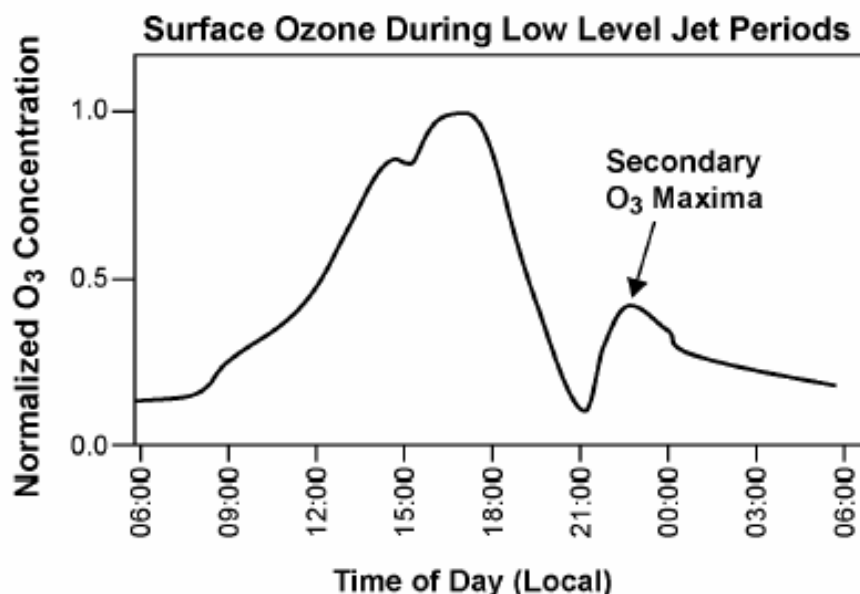


Figura 1.10: “Esquema mostrando la evolución diaria del ozono bajo la presencia de un chorro nocturno en niveles bajos. Destaca el desarrollo de un máximo secundario causado por el transporte vertical de ozono desde la capa residual. Fuente: United States Environmental Protection Agency, 2006b”

Estas corrientes nocturnas de chorro en niveles bajos están a menudo asociadas a cadenas montañosas, pues las montañas y los gradientes de presión a cada lado de una corriente en desarrollo ayudan a concentrar el flujo de aire hacia un pasillo horizontal.

La amplitud de este fenómeno puede variar de una localización a otra, pero suele ser menor de unos cientos de kilómetros, e inferior a mil kilómetros de longitud. La velocidad media del viento suele oscilar sobre 10 m/s, aunque en casos extremos podría alcanzar los 50 m/s.

#### 1.3.4. Transporte a escala sinóptica

Los procesos a escala sinóptica afectan notablemente al transporte de especies traza en las latitudes medias de ambos hemisferios. En el verano, se forman grandes regiones de altas presiones sobre los océanos subtropicales y pueden actuar como un sumidero efectivo de ozono, debido a la alta concentración de vapor de agua. Los flujos asociados con sistemas de bajas presiones o ciclones pueden facilitar las intrusionas de aire estratosférico.

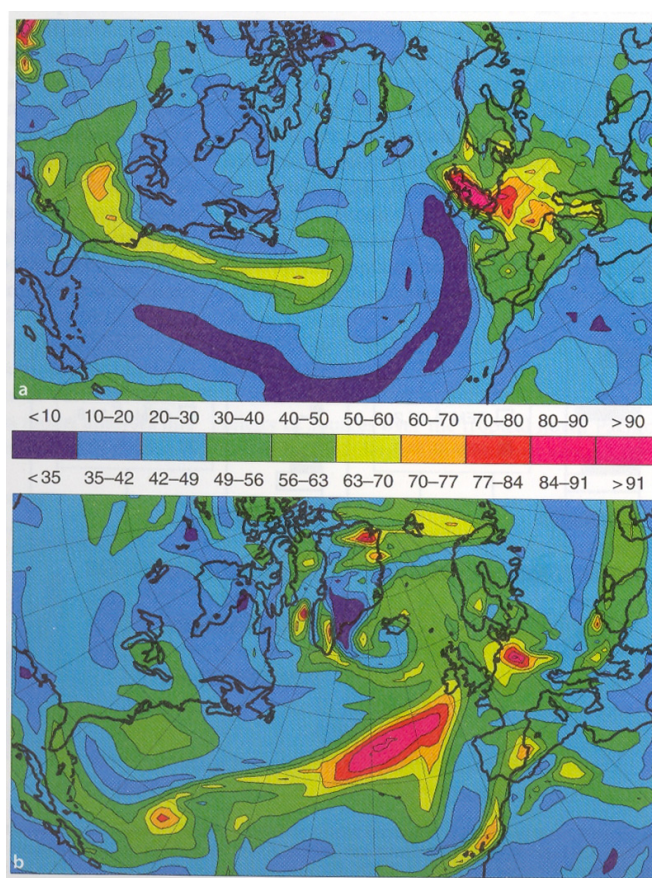


Figura 1.11: “Desarrollo de una pluma de ozono (ppb) sobre el océano Atlántico en Agosto de 1997, a partir de la simulación realizada por un modelo de transporte químico tridimensional. El cuadro superior muestra la concentración de ozono en superficie para el día 19 de Agosto de 1997, mientras el inferior representa la concentración de ozono el 21 de Agosto de 1997 a 7000 m de altura. Se observa el desplazamiento de las altas concentraciones superficiales de ozono situados inicialmente sobre el Este de los Estados Unidos, que tres días más tarde se han elevado a 7 km de altura, aportando una gran cantidad de ozono sobre la parte europea del océano Atlántico. Fuente: Brasseur et al., 2003”

Los sistemas frontales son un mecanismo ampliamente estudiado para el transporte de contaminantes desde las regiones continentales, poniendo de relieve su importancia para el transporte de ozono y sus precursores en la troposfera superior. Medidas aéreas de sustancias químicas en las proximidades de frentes en la troposfera media han revelado grandes diferencias entre las masas de aire, así como mezcla desde diferentes regiones fuente, en concreto, la existencia de múltiples capas con diferentes concentraciones de ozono y otros

contaminantes. Los sistemas frontales también contribuyen al transporte a larga distancia de ozono y sus precursores de un continente a otro, debido a que se desarrollan durante varios días, mientras se desplazan de oeste a este, como se observa en la figura 1.11 (Brasseur et al., 2003).

### 1.3.5 Sistemas de circulación a pequeña escala. Brisas marinas.

Los esquemas de circulación a escala subsinóptica son especialmente importantes para determinar niveles de contaminación atmosférica. Se trata de circulaciones que se desarrollan a una escala espacial de decenas de kilómetros. Estos sistemas incluyen las brisas marinas, las brisas de valle-montaña e incluso la circulación provocada por islas de calor en zonas urbanas, siendo de particular interés las brisas marinas, por su relación con las concentraciones de inmisión de ozono.

El proceso de formación de las brisas marinas (figura 1.12) comienza durante el día, con el calentamiento de la superficie terrestre, que provoca un movimiento ascendente del aire compensado por el flujo procedente del sistema de agua adyacente, que constituye la propia brisa marina. Estos vientos rotan en altura para producir un flujo de retorno en los estratos superiores. La máxima intensidad de esta circulación se produce durante las horas posteriores al mediodía. Posteriormente, el sentido de la circulación se invierte, desarrollándose una brisa terrestre, que adquiere su velocidad mayor poco después de establecerse el mayor contraste entre las temperaturas de la tierra y el mar. Esta circulación puede interactuar con el flujo sinóptico para atenuar o potenciar estos vientos de superficie.

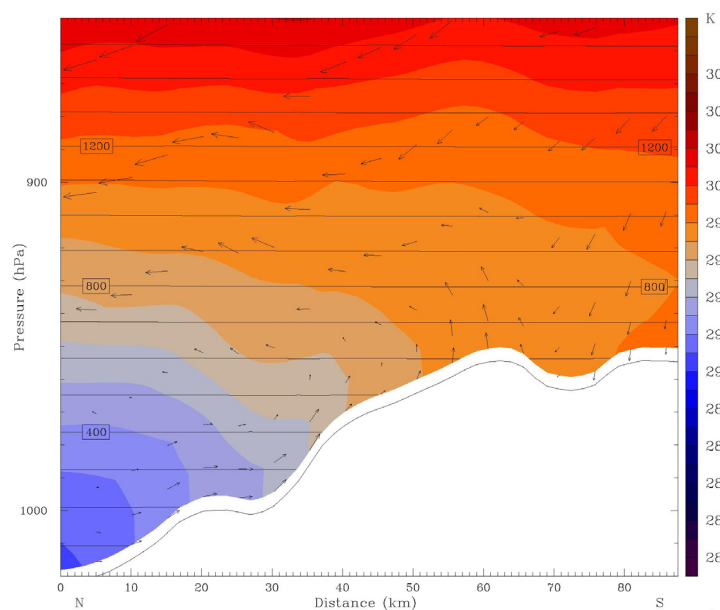


Figura 1.12: "Simulación meteorológica de una celda de recirculación en el litoral noroeste de la península Ibérica, a las 16 UTC del 16 de Septiembre de 2003, durante un episodio con altos niveles de ozono troposférico. Se observa la brisa marina del NO en dirección opuesta al flujo sinóptico de dirección SE. Fuente: Saavedra et al., 2007"

A causa de estos efectos, las brisas marinas ejercen diferentes efectos sobre los contaminantes emitidos en áreas costeras. Si la brisa marina se opone a la circulación sinóptica, se produce una zona de transición, denominada frente de la brisa, en la cual convergen ambos flujos opuestos. En esta zona, los vientos horizontales son débiles, de modo que los contaminantes se concentran y se transportan a capas superiores, formándose una "pared de contaminación", que en ocasiones provoca episodios importantes de ozono (Banta et al., 2005). Si domina la brisa marina, ésta transporta los contaminantes largas distancias hacia el interior. Durante la fase de la brisa terrestre, los contaminantes en superficie son desplazados de nuevo hacia el mar, causando la dilución y dispersión de los contaminantes.

Sin embargo, si el ciclo de brisas se prolonga durante varios días, bajo situaciones sinópticas poco marcadas con flujos de baja intensidad, se generan estratos aéreos con acumulación de contaminantes envejecidos, que causan importantes episodios de ozono durante el día, al entrar de nuevo la brisa marina hacia la costa (Millán et al., 1996; Evtugina et al., 2006).

## **1.4 Efectos del ozono sobre la salud y los ecosistemas**

El ozono troposférico se considera uno de los contaminantes más dañinos de la troposfera inferior. Altas concentraciones de ozono troposférico son tóxicas para la vegetación, de modo que reducen el rendimiento de las cosechas, actúa como un irritante respiratorio en animales superiores, disminuyendo la función pulmonar, y también daña materiales como piedra, ladrillos y goma.

### **1.4.1 Efectos sobre la salud humana**

El ozono es un oxidante potente, y como tal puede reaccionar con un amplio rango de componentes celulares y materiales biológicos. Estudios controlados en humanos indican que los niveles de ozono a los que se puede estar expuesto en varias regiones mundiales inducen importantes alteraciones funcionales y bioquímicas, principalmente en el tracto respiratorio. Estudios epidemiológicos recientes considerando series largas o decenas de comunidades, o usando otras aproximaciones estadísticas, han confirmado que el ozono está asociado con agudos efectos adversos en la salud, expresados como mortalidad o como morbilidad (Amann et al., 2008).

En particular, los daños pueden afectar al aparato respiratorio, dependiendo su extensión de la concentración de ozono y de la duración y patrón de la exposición. Los efectos observados en el tracto respiratorio incluyen inflamación, cambios morfológicos, bioquímicos y funcionales, además de debilitar el sistema inmunológico. En general, los efectos después de una exposición intermitente parecen ser más pronunciados que los derivados de una exposición continua. Datos obtenidos de animales y algunos estudios de autopsias indican que la exposición crónica al ozono provoca cambios importantes en las vías respiratorias al nivel de los bronquios terminales y respiratorios. Las pruebas epidemiológicas de efectos crónicos son menos concluyentes, aunque los estudios individuales con un mayor seguimiento de la exposición individual sí han proporcionado evidencias de los efectos crónicos del ozono sobre el asma y la función respiratoria (Amann et al., 2008).

El progreso de los cambios en el sistema respiratorio, observado tanto en animales de laboratorio como en investigaciones epidemiológicas, es complejo. Durante los primeros días de exposición se desarrolla la inflamación, que persiste a un nivel atenuado. Al mismo tiempo, progresa la hiperplasia epitelial, alcanzándose un nivel constante alrededor de una semana después de la exposición. Por el contrario, la fibrosis intersticial se incrementa lentamente y puede persistir incluso después de haber cesado la exposición.

En animales de laboratorio se han observado alteraciones en el tracto respiratorio con una exposición a niveles de ozono entre 160-400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante varias horas, entre las que destacan el aumento de infecciones bacterianas pulmonares, inflamación o la hiperplasia de células pulmonares de tipo II. La exposición prolongada a niveles superiores de ozono (240-500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) puede causar cambios morfológicos en el epitelio pulmonar. También se han identificado efectos extrapulmonares, como cambios en los glóbulos rojos y alteraciones en las glándulas tiroides y paratiroides. Estas alteraciones mostradas en estudios con animales concuerdan con las observaciones realizadas sobre humanos.

En estudios controlados con población humana, se ha constatado una reducción de la función pulmonar (Lippmann, 1991), siendo los niños los más afectados por este efecto, debido a su mayor inhalación de ozono y otros contaminantes del aire. Ello se debe a su mayor metabolismo basal, que ocasiona la inhalación de volúmenes superiores de aire y un ritmo respiratorio más acelerado. Por otro lado, su sistema inmune está menos desarrollado, y sufre un grado de estrés superior. Por esta razón, los niños presentan un mayor riesgo potencial al estar expuestos a concentraciones elevadas de ozono en el ambiente. También se han

asociado síntomas respiratorios, como tos, a concentraciones de ozono no superiores a 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , al igual que un incremento en el número de admisiones en los hospitales a causa de problemas respiratorios y crisis de asma.

Otro grupo de riesgo está constituido por la gente que practica ejercicio en el exterior durante las horas del día en que las concentraciones de ozono son superiores. Este grupo comprende a niños, trabajadores manuales y atletas, que podrían aumentar la dosis de ozono recibida al presentar una mayor tasa de inhalación. Al conjunto de la población sana debe añadirse los pacientes de asma, en torno a un 5-10% de la población, también considerados un grupo de riesgo, ya que el ozono contribuye a agudizar la enfermedad y su mortalidad y morbilidad, como han demostrado un importante número de estudios.

La asociación de alteraciones diarias en la mortalidad con cambios en los niveles atmosféricos de ozono también ha sido estudiada, existiendo evidencias de que la tasa diaria de mortalidad se incrementaba un 2.3% por cada 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de aumento en el máximo diario de concentración horaria de ozono registrado en varias ciudades europeas (Touloumi et al., 1997). Otros estudios epidemiológicos han mostrado que la exposición al ozono durante episodios estivales de contaminación atmosférica está asociada con la exacerbación del asma, el aumento de los ingresos y visitas a los servicios de urgencias hospitalarias por ataques de asma y con el mayor uso de medicamentos contra el asma (Weisel et al., 1995). Se estima que el ozono ha causado aproximadamente 21000 casos de muertes prematuras en la Unión Europea en el año 2000 (considerando 25 países). Además, se ha asociado el ozono con 14000 ingresos hospitalarios motivados por causas respiratorias y otros efectos sobre la salud diaria de grandes poblaciones en términos de dificultades respiratorias leves, uso de medicamentos para la respiración (especialmente en niños), tos y síntomas laringo-respiratorios, afectando a entre 8 y 108 millones de personas por día, dependiendo de la prevalencia (Amann et al., 2008). Además, los niveles urbanos de ozono se relacionan con cambios en reacciones de inflamación nasal en sujetos jóvenes y niños (Calderón-Garcidueñas et al., 1995).

#### *1.4.2 Efectos sobre la vegetación.*

El potencial del ozono como contaminante fitotóxico se conoce desde finales de los años 50. Sus efectos pueden manifestarse como síntomas visibles, incluyendo daños foliares, pérdidas de biomasa o crecimiento y alteraciones en las estructuras reproductoras de las plantas o en la calidad de los frutos. Sin embargo, previamente a las alteraciones visibles, se ven afectados numerosos procesos bioquímicos y fisiológicos.

El grado de alteración o la toxicidad del contaminante viene determinado principalmente por tres procesos: la captación del contaminante, las reacciones químicas del mismo en los diferentes lugares de actuación y la capacidad de la planta para activar sus mecanismos de defensa.

El ozono penetra en las plantas a través de los estomas en la superficie de las hojas, reaccionando rápidamente con la humedad en la superficie de las células. Las especies oxigenadas resultantes son muy reactivas, y pueden sobrecargar los mecanismos de protección naturales de las plantas. Las membranas celulares pueden dañarse, provocando la destrucción de las células y el desarrollo de áreas de necrosis o clorosis en la superficie foliar. Daños de este calibre suelen producirse como respuesta a episodios de ozono de 2 - 3 días de duración. Si el estrés por ozono se prolonga, pueden tener lugar cambios fisiológicos, como una reducción de la tasa fotosintética, lo cual conduce a disminuciones del rendimiento o a alteraciones en la distribución de la biomasa entre hojas, tallos y raíces. De acuerdo con ello, los efectos del ozono se han clasificado en función del tipo de exposición al contaminante en agudos y crónicos:

- Daños agudos, que tienen lugar durante episodios de concentraciones elevadas del contaminante. En la mayoría de los casos se producen daños foliares visibles como consecuencia de la muerte celular y se desarrollan en unas pocas horas o días después de la exposición de la planta al ozono en forma de moteaduras de color pardo-rojizo, quemaduras o áreas blanquecinas.

- Daños crónicos, provocados por concentraciones bajas de ozono durante largos periodos de tiempo. Se manifiestan más lentamente que los primeros, observándose un lapso de tiempo que varía entre días y semanas después de la exposición de la planta al ozono. Es frecuente que se aceleren los procesos de senescencia foliar o de clorosis internervial en el haz de la hoja. Aunque este tipo de exposición implica un impacto inicial menor, puede tener unas consecuencias acumulativas graves. En especies leñosas puede producir efectos indirectos, también llamados “efectos memoria”, como son los cambios en la susceptibilidad de la planta frente a otros tipos de estrés, tales como heladas o sequías, o bien alteraciones de la sensibilidad al contaminante de los brotes nuevos en el sentido de aumentarla o reducirla.

Existen numerosos estudios que demuestran que la fitotoxicidad del ozono está modulada por diversos factores ambientales, fundamentalmente la humedad del suelo, la temperatura y la humedad relativa del aire. De acuerdo con esto, la situación se agrava porque los episodios de ozono a menudo se desarrollan durante el período de crecimiento de las cosechas y la vegetación (primavera-verano). Los efectos acumulativos del daño en las estructuras celulares y en la reducción de procesos clave como la fotosíntesis se manifiestan como una reducción del rendimiento de las semillas al final del período de crecimiento. El ozono suele provocar una reducción en el área foliar de las plantas y una menor duración de las propias hojas. La planta, al perder relativamente pronto las hojas, capta una menor cantidad total de luz. A medida que se desarrolla el fruto, la disminución del CO<sub>2</sub> fijado hace que la planta sea incapaz de mantener el crecimiento de todas las semillas. Así, muchas vainas o espigas caen de la planta, perdiéndose muchas semillas. Por ello, la reducción del rendimiento causada por el ozono se debe a un descenso en el número de semillas por fruto y a un descenso en el peso individual de cada semilla.

La toxicidad del ozono puede manifestarse en las plantas de uso agronómico como pérdidas de productividad económica. Existen numerosos estudios que han demostrado experimentalmente que las concentraciones ambientales de ozono pueden inducir reducciones en la producción de cultivos agrícolas (Black et al., 2000). En dichos estudios el material vegetal ha sido expuesto al ozono en condiciones cercanas a las de campo, aplicando concentraciones de ozono dentro del rango registrado en el ambiente rural. Se han demostrado pérdidas de producción debidas al ozono en los cultivos agrícolas europeos de patata, soja, colza, trigo, judías y plantas forrajeras (Fumagalli et al., 2001) así como en la productividad del tomate y la sandía (Gimeno et al., 1999). Otros trabajos (Mills et al., 2003) llevados a cabo a escala europea han identificado qué cultivos se encuentran más amenazados por la acción del ozono troposférico, encontrándose las mayores pérdidas económicas en trigo, patata, remolacha, colza, uva, maíz y girasol.

Respecto a la calidad de la producción, existen pocos trabajos en los que se analice el efecto de los contaminantes atmosféricos sobre esta propiedad. No obstante, algunos estudios señalan que el efecto predominante del ozono es la reducción de la talla de los frutos. Las plantas que crecen en áreas con niveles bajos de ozono presentan frutos de mayor tamaño y, además, con una distribución de frutos comerciales homogénea durante todo el periodo productivo de la planta. Sin embargo, las parcelas situadas en ambientes con niveles altos de ozono presentan frutos de menor tamaño y con una proporción de frutos comerciales más elevada en las cosechas tempranas, que tiende a reducirse a medida que avanza la estación productiva. Esto hace que los frutos de mayor interés comercial aparezcan en el periodo temprano, menos productivo, mientras que el periodo posterior, de producción más intensa, coincide con el de frutos menos comerciales. Estas respuestas combinadas con la reducción general de la producción inducida por el ozono pueden tener importantes consecuencias económicas. Otros estudios señalan el número de frutos como el parámetro más afectado por el ozono, y no la talla, de modo que en este caso las pérdidas de producción se atribuyen a una disminución en el número de frutos.

En árboles, aunque los datos experimentales son más escasos, sólo en Europa ya existe un importante número de estudios (Skelly et al., 1999; Sanz et al., 2000; de Vries et al., 2003; Ferretti et al., 2007; Lorenz et al., 2008) que ponen de manifiesto los daños provocados en masas forestales autóctonas por la exposición a elevadas concentraciones de ozono. Esta contaminación por ozono no deja residuos elementales que puedan ser detectados por

técnicas analíticas, de modo que los daños visibles en hojas y acículas son las únicas evidencias detectables en el campo. Entre los síntomas de daño foliar provocado por el ozono destacan la clorosis, las manchas pigmentarias en la superficie de las hojas y la caída prematura de las mismas.

Por tanto, la exposición a elevadas concentraciones de ozono causa daños en especies forestales y de cultivo, así como en masas naturales de vegetación, lo cual conlleva caídas de calidad, pérdidas económicas y de biodiversidad.

#### *1.4.3 Efectos sobre materiales.*

El ozono puede contribuir de varios modos en la degradación de materiales. El efecto directo en los materiales orgánicos es relativamente fácil de determinar, pero el ozono suele ir asociado a múltiples contaminantes, lo cual hace que este efecto directo sólo sea una parte de la influencia total, que también incluye efectos indirectos y sinérgicos.

La degradación de materiales orgánicos se ha asociado tradicionalmente a la presencia de ozono junto con otros factores naturales, como la radiación solar y la temperatura. Los principales efectos del ozono se observan en polímeros orgánicos que poseen dobles enlaces en su estructura, que pueden romperse e incluso formarse de nuevo en otras partes de la molécula. Estas alteraciones disminuyen su maleabilidad y elasticidad, pudiendo aumentar su fragilidad (European Union, 1999b).

El ozono es el principal contaminante asociado con la degradación de la goma, pero la mayoría de los materiales orgánicos, como las superficies pintadas, los polímeros y muchos tejidos son sensibles al mismo, provocando la rotura del caucho y la pérdida de color en pinturas y tejidos, hasta su rotura. Los daños afectan sobre todo a aislantes, juntas, pinturas, ventanas de PVC, etc., aunque es difícil distinguir sus efectos de los causados por la luz directa del sol.

En cuanto a materiales inorgánicos, se considera un oxidante del  $\text{SO}_2$ , aunque probablemente tenga otros papeles como potenciar la formación de óxidos y reducir la eficacia de los productos anticorrosión.

La presencia de ozono en la atmósfera suele estar ligada a otros contaminantes secundarios generados por su intervención, como  $\text{HNO}_3$ , que tienen un alto potencial de alterar una gran gama de materiales. Por otro lado, las sinergias en la acción del ozono con otros contaminantes, como  $\text{SO}_2$  o  $\text{NO}_2$ , aumentan notablemente los daños sobre materiales inorgánicos, al provocar efectos sinérgicos (European Union, 1999).

### **1.5 El ozono en regiones litorales de la península Ibérica**

La contaminación fotoquímica está considerada actualmente entre las más importantes para la mayor parte de los países industrializados. En la península Ibérica, la presencia de ozono es considerable en todas las áreas, especialmente las periféricas y mediterráneas, debido tanto al singular comportamiento de este producto, como a las condiciones meteorológicas y climáticas típicas de nuestra península. Por estas razones, la contaminación por ozono en España puede considerarse entre las de mayor incidencia y de las que necesitan claras estrategias de información y actuación.

Así España, como país situado entre los veinte más desarrollados, tanto en producción industrial como en PIB, presenta un considerable nivel de contaminación atmosférica, especialmente en sus áreas más productivas. Sin embargo, el importante nivel de emisión de precursores debido al grado de desarrollo industrial no es el único motivo; a ello se añade la radiación solar recibida, ya que treinta y dos provincias del territorio nacional registran o superan las 2.700 horas solares anuales. En consecuencia, se dan las condiciones óptimas para la formación de procesos fotoquímicos y la generación de ozono de tal manera que este producto puede ser ya considerado como uno de los principales contaminantes atmosféricos en nuestro país.



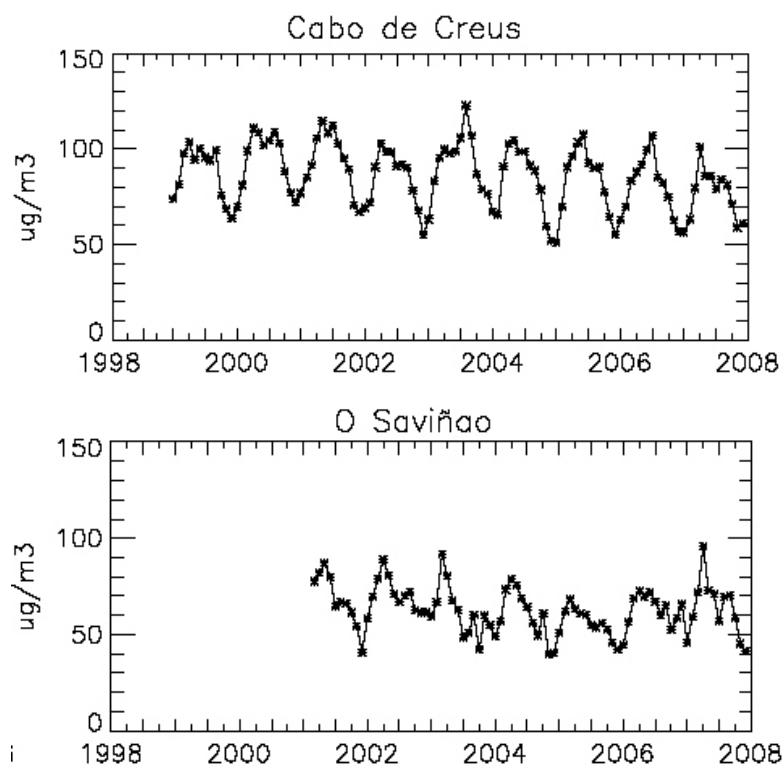


Figura 1.13: “Series temporales de valores medios mensuales de ozono troposférico registradas en las estaciones rurales de fondo del programa EMEP ES10 Cabo de Creus, en Girona, y ES16 O Saviñao, en Lugo. Adaptado de Fjæraa y Hjellbrekke, 2009”

Número de superaciones de umbrales de protección a la salud humana e información a la población (máximo diario de medias octohorarias > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y media horaria > 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )					
Estación EMEP	2004	2005	2006	2007	2008
Víznar	36 / 0	76 / 0	84 / 0	61 / 0	34 / 0
Niembro	7 / 0	13 / 0	7 / 0	9 / 0	0 / 0
Campisábalos	20 / 0	59 / 0	35 / 0	5 / 0	46 / 0
Cabo de Creus	44 / 2	60 / 1	26 / 4	23 / 0	12 / 0
Barcarrota	28 / 0	40 / 0	37 / 2	12 / 0	15 / 0
Zarra	32 / 0	49 / 3	60 / 0	15 / 0	38 / 0
Peñausende	24 / 0	51 / 6	29 / 0	30 / 0	34 / 0
Els Torms	37 / 0	66 / 0	58 / 2	45 / 1	37 / 0
Risco Llano	108 / 0	59 / 4	45 / 0		
O Saviñao	13 / 0	15 / 0	16 / 3	21 / 0	4 / 0

Tabla 1.3: Resumen de las superaciones de los umbrales de ozono establecidos por la Directiva 2008/50/EC en 10 estaciones de la Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo (EMEP) durante el período 2004-2008. Adaptado de las Memorias Medioambientales “Medio Ambiente en España” correspondientes a los años 2004-2008 (Ministerio de Medio Ambiente, 2004-2008).

Sin embargo, el perfil de los niveles de contaminación por ozono en la península Ibérica es muy heterogéneo; entre las causas principales destacan su situación geográfica en latitudes subtropicales, a caballo entre el océano Atlántico y el mar Mediterráneo, su compleja orografía, con numerosas barreras montañosas y una longitud de costas superior a los 6500 km, su

notable variabilidad climática, con clima oceánico en el área septentrional y mediterráneo en el resto, y su poblamiento irregular, con grandes diferencias de densidad demográfica entre unas zonas y otras. Un ejemplo lo constituyen las series históricas de ozono troposférico en estaciones EMEP, que muestran acusadas diferencias en los valores medios mensuales, como se puede observar en la figura 1.13, o las tablas 1.3-1.5, que reflejan los diferentes niveles de ozono en varias áreas peninsulares a partir del número de superaciones de los umbrales legislativos.

Esta importante variación en los niveles de ozono en función del área geográfica justifica en parte la irregular distribución de los estudios sobre contaminación fotoquímica en la península Ibérica en general y en España en particular.

La región mediterránea es el área peninsular que presenta, con diferencia, un mayor número de estudios referidos a la contaminación por ozono troposférico: a los altos niveles de radiación recibida se añaden otros condicionantes como las importantes emisiones de precursores procedentes del tráfico (más elevadas en la temporada turística, que coincide con los meses de mayor radiación solar), así como de otras emisiones de carácter industrial (refinerías, etc.). Por otro lado, los frecuentes fenómenos de recirculación atmosférica, provocados por vientos locales como las brisas marinas y vientos orográficos, junto con el establecimiento de la característica baja térmica ibérica, también contribuyen a mantener elevados valores de inmisión de ozono en esta zona, lo cual ha sido estudiado con intensidad a lo largo de las últimas dos décadas, destacando los proyectos MECAPIP (MEso-meteorological Cycles of Air Pollution in the Iberian Peninsula), y sus continuaciones RECAPMA (Regional Cycles of Air Pollution in the Mediterranean Area) y SECAP (South European Cycles of Air Pollution), que extendieron el área de análisis al Mediterráneo Occidental y a toda la costa sur europea. Estos proyectos, desarrollados por la Unión Europea desde finales de los años 80 hasta principios de la década actual, subrayan el efecto de las circulaciones atmosféricas estivales características del área mediterránea sobre los niveles de contaminación por ozono troposférico en el este y el centro de la península Ibérica (Millán et al., 1996), y han dado origen a un gran número de artículos centrados en la costa mediterránea española. En estos trabajos se ha avanzado mucho en el conocimiento de la relación entre la dinámica atmosférica y la contaminación fotoquímica, poniéndose de manifiesto la influencia de la baja térmica estival en la entrada hacia el interior de la península de las importantes emisiones costeras y su funcionamiento como “gran reactor fotoquímico” (Millán et al., 1991; Millán et al., 1997), el papel de los ciclos meso-meteorológicos, en especial las brisas marinas, en el desarrollo de los ciclos de ozono en la costa levantina, asociados a la persistencia de elevados niveles de ese contaminante (Martín et al., 1991; Millán et al., 2000; Gangoiti et al., 2002), el transporte a larga distancia de estratos con altos contenidos de ozono desde Europa continental hasta el área mediterránea (Gangoiti et al., 2001) y la costa norte peninsular (Alonso et al., 2000) y otros aspectos más puntuales, como la deposición de nitrógeno en el área mediterránea asociada al desarrollo de los ciclos de ozono (Millán et al., 2002; Sanz et al., 2002) o los daños a los ecosistemas forestales provocados por la persistencia de ozono (Sanz y Millán, 1998), entre otros.

Además de las investigaciones realizadas al amparo de estos tres proyectos europeos, existen otros muchos trabajos centrados en el área mediterránea, con temática variada pero siempre en relación con las importantes concentraciones de inmisión de ozono troposférico que afectan a esta zona peninsular, como pone de manifiesto la figura 1.14. Destacan los trabajos sobre el origen de episodios de ozono basados en simulación fotoquímica, bien en entornos metropolitanos, como Barcelona (Toll y Baldasano, 2000; Barros et al., 2003; Ortega et al., 2004), bien a nivel regional (Jiménez et al., 2005; Jiménez et al., 2006b; Gonçalves et al., 2009), sobre análisis de patrones diarios de ozono en función de las características del área (Ribas y Peñuelas, 2004), y estudios de la influencia de la orografía compleja en la contaminación atmosférica (Soler et al., 2004; Soler et al., 2004b; Jiménez et al., 2005; Caballero et al., 2007; Castell et al., 2008).

En resumen, el comportamiento de los niveles de ozono en el área mediterránea peninsular ha sido objeto de un intenso estudio durante las últimas dos décadas, dados sus elevados niveles de ozono troposférico registrado, obteniéndose incluso resultados extrapolables a otras zonas de la península Ibérica, como la costa atlántica (Barros et al., 2003) y cantábrica (Alonso et al., 2000).

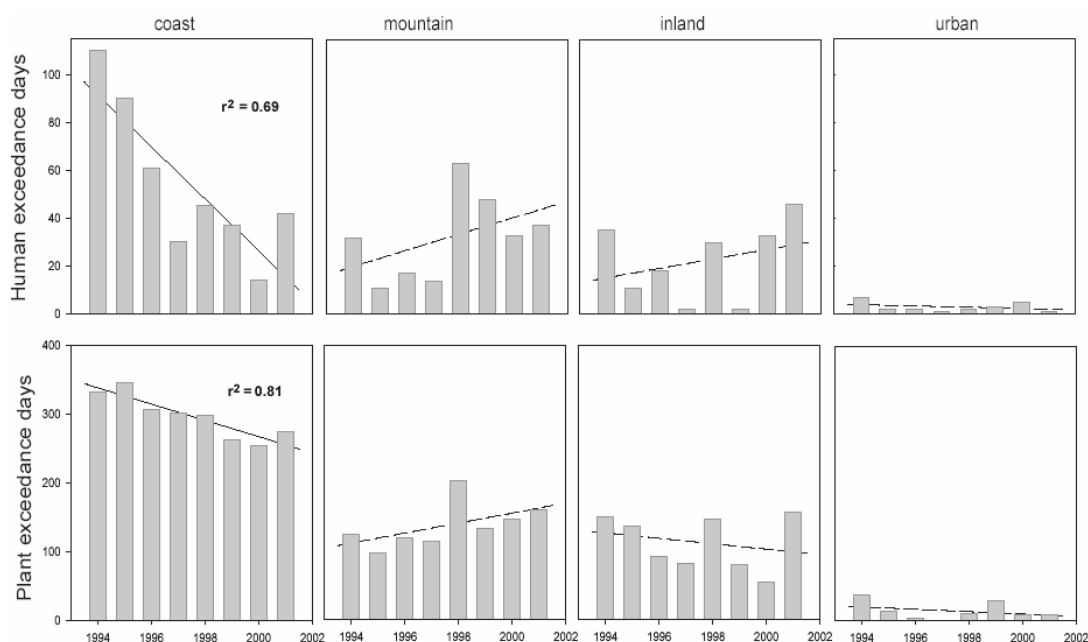


Figura 1.14: “Número anual de superaciones de los niveles de ozono en cuatro estaciones catalanas de calidad de aire, cada una representativa de un ambiente (costa, interior, urbano y montaña) durante el periodo 1994-2001. Los umbrales de superación han sido definidos según la antigua Directiva 92/72/EEC, que establecía el valor umbral de protección a la salud humana en  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media octohoraria y el umbral de protección a la vegetación en  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media diaria. Adaptado de Ribas y Peñuelas, 2004”.

El litoral sur del Mediterráneo también ha sido estudiado en relación con sus niveles de ozono troposférico, aunque con mucha menos intensidad que las costas catalana y levantina. Destacan los trabajos de Dueñas et al., que han analizado las variaciones estacionales de ozono, y su relación con variables meteorológicas, hasta obtener varios modelos de predicción de concentraciones de ozono: un modelo empírico basado preferentemente en temperatura, viento y humedad (Dueñas et al., 2002) y modelos estocásticos, basados en el estudio de series temporales precedentes (Dueñas et al., 2005). Estos análisis se han centrado sobre todo en los patrones diarios de ozono, tanto en áreas urbanas como rurales (Dueñas et al., 2004), y coinciden en sus conclusiones, destacando los mayores niveles de ozono en estaciones rurales, y sus ciclos diarios más débiles, con mayor persistencia en estaciones rurales, debido a su menor reducción durante los períodos nocturnos (menor desarrollo de la capa estable nocturna y emisiones de NO más reducidas).

La costa andaluza constituye, como casi toda la península Ibérica, otra zona muy susceptible a la contaminación por ozono troposférico, dada su notable temperatura media ( $18^\circ\text{C}$ , la mayor de Europa) y su elevado número de horas de sol, que se añaden a una notable emisión de precursores fotoquímicos, causada por la existencia de importantes áreas urbanas densamente pobladas y un notable número de instalaciones industriales. A pesar de ello, el número de estudios sobre contaminación fotoquímica en Andalucía es muy bajo. Uno de los trabajos más relevantes sobre este tópico es un estudio inicial sobre los ciclos estacionales, semanales y diarios de ozono en el entorno de Sevilla (Adame et al., 2008), como primer paso para analizar la dinámica del ozono en el sur peninsular. Los resultados obtenidos están de acuerdo con las conclusiones establecidas para el litoral mediterráneo, subrayando el papel de las circulaciones mesoescalares, como las brisas, y los procesos de formación fotoquímica local unidos al transporte horizontal y vertical de ozono. Existen otros estudios recientes relacionados con el ozono en esta región, pero de carácter más específico, como una propuesta de zonificación de ozono en Andalucía (De la Morena et al., 2008) y el análisis del impacto de una central de ciclo combinado sobre los niveles de ozono en función de su ubicación en la provincia onubense, atendiendo principalmente a las zonas sensibles a COVs o a  $\text{NO}_x$  (Castell et al., 2009; Castell et al., 2009b).

El litoral atlántico luso es otra región geográfica en la cual se ha estudiado intensamente la contaminación por ozono troposférico, dados los altos niveles que se suelen registrar frecuentemente en esta zona, superando en numerosas ocasiones el umbral de información a la población (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008). Los trabajos más recientes en zonas costeras de carácter rural han sido desarrollados por Evtugina et al. (2006, 2007), basados en campañas de medición de ozono y precursores fotoquímicos, como NO<sub>x</sub> y COVs, y en la posterior modelización de los episodios de ozono. Una vez más, se pone de manifiesto la gran importancia de las brisas marinas como fenómeno regional que facilita el transporte de precursores y la formación de ozono en áreas litorales, al promover la mezcla de las masas aéreas y su recirculación, así como la sensibilidad de la generación fotoquímica de ozono a los COVs biogénicos (isopreno, fundamentalmente) en áreas rurales escasamente pobladas y con poca actividad industrial. Previamente se habían obtenido resultados similares sobre la relación de las circulaciones de mesoscala y la dispersión de contaminantes en el litoral portugués, pero haciendo hincapié en la influencia de la topografía costera (Carvalho et al., 2006). También se han desarrollado importantes estudios en entornos urbanos, como el área metropolitana de Lisboa, relacionados con el efecto del cambio climático en la contaminación fotoquímica en algún caso (Borrego et al., 2000) o analizando las circulaciones de mesoscala y la influencia de la topografía en otros (Barros et al., 2003).

Un número importante de estudios sobre la contaminación por ozono se centra en el litoral cantábrico peninsular ya que, aunque las condiciones climáticas de esta zona no son tan favorables para la generación fotoquímica de ozono, la existencia de importantes focos industriales y la posibilidad de transporte desde el continente europeo contribuyen a la frecuente aparición de episodios de ozono, sobre todo en época estival, como se observa en la tabla 1.4. Sin embargo, la mayoría de los trabajos se concentran en la costa oriental, destacando la región del País Vasco, mientras que en la costa noroccidental apenas se han realizado análisis sobre contaminación atmosférica por ozono troposférico.

Año	Máximo diario de las medias octohorarias > 120 µg/m <sup>3</sup>		Media horaria > 180 µg/m <sup>3</sup>		
	Número de días	Promedio de 3 años	Nº de días	Nº de horas	Nº de estaciones
1999	37		2	7	2
2000	23		0	0	0
2001	<b>32</b>	<b>30</b>	<b>5</b>	<b>14</b>	<b>6</b>
2002	17	24	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
2003	<b>64</b>	<b>37</b>	<b>12</b>	<b>48</b>	<b>20</b>

Tabla 1.4: Resumen de las superaciones de los niveles de ozono en las 37 estaciones de la red de vigilancia del País Vasco durante el período 1999-2003. Los valores en negrita indican superaciones de los umbrales de protección a la salud humana y de información a la población, establecidos por la Directiva 2008/50/EC, relativa al ozono en el aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. Adaptado de Gangoiti et al., 2006.

Algunos de estos trabajos son derivados de los proyectos citados anteriormente, como el RECAPMA, y se centran sobre todo en el transporte a larga distancia de contaminantes (Alonso et al., 2000; Gangoiti et al., 2002). Estas investigaciones, realizadas a partir del estudio de episodios con altas concentraciones de ozono y campañas de medición de ozono en altura, han puesto de manifiesto la existencia de transporte de ozono procedente de Europa continental y del Mediterráneo occidental hacia la costa norte peninsular, bajo condiciones sinópticas caracterizadas por el establecimiento de un anticiclón de bloqueo sobre las Islas Británicas y su posterior desplazamiento hacia el este. Trabajos posteriores sobre nuevos episodios, basados en el uso de modelos de dispersión (Gangoiti et al., 2006; Valdenebro et al., 2008), han confirmado estas vías de transporte, y añadido otras nuevas, como la llegada de masas de ozono desde el centro peninsular durante la noche, a través de estratos nocturnos

estables y estratificados. Otro grupo de estudios se centra en la búsqueda de patrones meteorológicos asociados a períodos con elevados niveles de ozono troposférico (Albizuri, 2004; Albizuri, 2005), para poder lograr una acertada predicción de los mismos.

Año	Máximo diario de las medias octohorarias > 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		Media horaria > 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
	Número de días	Promedio de 3 años	Nº de días	Nº de horas	Nº de estaciones
2003	Sin dato	-	5	11	4
2004	Sin dato	-	3	8	3
2005	Sin dato	-	0	0	0
2006	Sin dato	-	0	0	0
2007	26	-	0	0	0
2008	6	-	0	0	0

Tabla 1.5: Resumen de las superaciones de los niveles de ozono en cinco estaciones de la Red de Vigilancia Atmosférica de Galicia durante el período 2003-2008. Las estaciones seleccionadas son B1-A Magdalena, B2-Louseiras, C9-Mourence, F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova. Los valores en negrita indican superaciones de los umbrales de protección a la salud humana y de información a la población, establecidos por la Directiva 2008/50/EC, de “calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia”. Fuente: Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible de la Xunta de Galicia, 2003-2006.

En el resto de la cornisa cantábrica (Asturias, Cantabria) y el noroeste peninsular (Galicia), los estudios sobre contaminación por ozono troposférico son muy escasos, siendo esta zona la menos analizada a nivel peninsular. La razón principal de esta carencia de análisis radica en los bajos niveles de ozono registrados en el norte (tabla 1.5), en comparación con la mitad sur y el este de la península Ibérica, dadas las condiciones climáticas de estas regiones, claramente menos favorables a la generación fotoquímica de ozono, al registrar un número inferior de horas de sol, temperaturas más bajas y mayores intensidades de viento. Sin embargo, durante las estaciones de primavera y verano, suelen producirse algunos episodios con altos niveles de ozono, al coincidir factores meteorológicos propicios para el desarrollo de concentraciones potencialmente elevadas de ozono y precursores fotoquímicos. En este sentido debe destacarse que los períodos de altas temperaturas y cielos despejados se producen en el tercio norte con vientos de componente Este, principalmente el conocido como “nordés”, de dirección NE, y vientos del SE, aunque con menor frecuencia. Estos últimos vientos proceden directamente de la Meseta, con dirección sudeste, mientras que el “nordés” procede del continente a través del mar Cantábrico. Por tanto, el transporte de contaminantes primarios y del propio ozono se ve incrementado durante estos períodos, que coinciden con situaciones sinópticas adecuadas para la formación fotoquímica de ozono troposférico. Como consecuencia, la posibilidad de aparición de episodios de contaminación fotoquímica en estas áreas durante los meses más calurosos del año no es despreciable, sobre todo si se tiene en cuenta el tráfico creciente y la importante industrialización del litoral norte.

La tabla 1.3 también indicaba claramente estas diferencias en la frecuencia de aparición de episodios importantes de ozono troposférico en las diferentes áreas costeras españolas. Las estaciones atlánticas más septentrionales, como Niembro (Asturias) y O Saviñao (interior de Lugo), presentan un número de superaciones de los umbrales legislativos de ozono sensiblemente inferior a las estaciones mediterráneas, como Cabo de Creus (Girona) o Víznar (Granada), y a las estaciones interiores como Barcarrota (Badajoz), Risco Llano (Toledo) o Campisábalos (Guadalajara). Por tanto, las estaciones atlánticas son las que menores niveles de ozono presentan entre todas las estaciones EMEP españolas, aunque no están exentas de registrar importantes concentraciones de ozono, como ocurrió en la estación de O Saviñao en 2006.

Algunos de los escasos trabajos realizados en Galicia sobre el ozono troposférico se basa en el análisis de los efectos del penacho de la central térmica de Endesa-As Pontes en los niveles de

NO, NO<sub>2</sub> y ozono medidos en dos estaciones circundantes, constatando un descenso de las concentraciones de ozono debido al impacto directo de la pluma, con altas concentraciones de NO (Peña et al., 2000; Méndez et al., 1997). Un estudio más reciente se ha centrado en establecer un modelo predictivo de ozono basado en el análisis de series temporales para tres localidades gallegas, aunque los períodos de análisis seleccionados son cortos, sobre 3 meses de duración (Castellanos et al., 2008). No se conocen más estudios realizados en el noroeste peninsular (Asturias y Galicia) sobre ozono troposférico, salvo algunas referencias indirectas y poco relevantes a las estaciones EMEP atlánticas en trabajos de índole general, sobre patrones diarios y estacionales de ozono en la península Ibérica (Gimeno et al., 1999b).

### **METODOLOGÍA DE ANÁLISIS EPISÓDICO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA FOTOQUÍMICA**

---

Este capítulo describe el método empleado para el estudio individual de cada episodio, desde la selección del mismo hasta el establecimiento de hipótesis que permitan comprender su origen y desarrollo.

El proceso comienza con la selección de los períodos con elevados niveles de inmisión de ozono superficial, estableciendo un valor umbral de ozono y delimitando la duración temporal de cada período, conformando así un “episodio con altos niveles de ozono troposférico”, descrito en la sección 2.1.

Tras la selección de los episodios y el establecimiento de su duración, se analizan las condiciones sinópticas dominantes durante cada uno de ellos, con la intención de realizar una clasificación de los patrones que acontecen en los episodios de elevada concentración de ozono y determinar posibles fenómenos de transporte de ozono a larga distancia, según se explica en la sección 2.2.

Una vez establecida la climatología sinóptica y la clasificación de los episodios identificados según su patrón sinóptico, el paso siguiente, comentado en la sección 2.3, consiste en analizar las condiciones meteorológicas locales en el área de trabajo, dada su influencia determinante en todos los procesos físicos y químicos involucrados en la formación fotoquímica del ozono, al igual que en fenómenos de transporte y dispersión local.

El estudio de las concentraciones horarias de ozono troposférico y precursores primarios (óxidos de nitrógeno), descrito en la sección 2.4, se realiza en paralelo con el análisis episódico de la meteorología local, debido a la importancia de la misma y de los precursores primarios en relación con los procesos de formación de ozono superficial.

La integración de toda la información anterior (datos meteorológicos y de concentración de contaminantes), se realiza por medio del análisis de los resultados de simulaciones de calidad de aire, que requieren simulaciones meteorológicas previas para proporcionar datos de entrada al modelo de calidad de aire. Estas simulaciones de calidad de aire no han sido realizadas en el ámbito de este trabajo, habiéndose utilizado las desarrolladas por varios organismos europeos de predicción de calidad de aire. La sección 2.5 explica el análisis de ambos tipos de simulaciones, que permiten profundizar en el desarrollo de los episodios y proporcionan información sobre la evolución temporal y la distribución espacial del ozono troposférico en los episodios, al completar con datos sintéticos aquellas zonas en las cuales no se dispone de medidas.

El resultado final consiste en la elaboración y validación de diversas hipótesis que permitan explicar las causas de los niveles de ozono registrados durante los períodos seleccionados, a partir de los datos procesados previamente, según se recoge en la sección 2.6.

## **2.1 Definición de episodio. Criterios de selección.**

El punto de partida consiste en el establecimiento de un valor umbral de inmisión de ozono, por encima del cual se considera que tiene lugar un episodio con concentraciones elevadas de ozono troposférico.

El marco legislativo actual sobre contaminación por ozono troposférico a nivel de la Unión Europea está integrado por la Directiva 2002/3/CE, de 12 de febrero de 2002, “relativa al ozono en el aire ambiente” (European Union, 2002), transpuesta a la legislación nacional por el Real Decreto 1796/2003, de 26 de diciembre, “relativo a ozono en el aire ambiente” (Ministerio de la Presidencia, 2004). Existe una directiva europea más reciente, la Directiva 2008/50/EC, del 21 de Mayo de 2008, “relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa” (European Union, 2008), pero aún no se ha incorporado a la legislación nacional. Ambas normativas establecen una serie de valores límite para el ozono troposférico, pero que no son discriminatorios en el caso de la Comunidad Gallega, pues en el período 2003-2006 el umbral de información a la población ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  horarios) se superó únicamente en once jornadas diferentes, muchas de ellas consecutivas, mientras el umbral de alerta ( $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  horarios) no registró ninguna superación, según datos de la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia (Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible, 2003-2006).

Se optó por reducir un 15% el valor límite de información a la población para adoptar un umbral único para todas las localizaciones, de modo que el umbral para la identificación de episodios con altos niveles de ozono se estableció en un valor promedio horario de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de inmisión de ozono troposférico. Aunque el establecimiento de valores límite para un contaminante es una decisión con carácter subjetivo, tomada en función de parámetros como los valores medios registrados en la región de estudio o el tipo de evento a analizar, en la literatura aparecen umbrales para el ozono superficial próximos al elegido en este caso: en Israel, promedio horario de 80 ppbv –sobre  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - durante dos horas consecutivas (Dayan y Levy, 2002), 70 ppbv horarios en Australia (Hurley y Mannins, 1995),  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la Comunidad Valenciana (Castell y Mantilla, 2003), etc.

Sin embargo, no se ha mantenido este valor horario de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como criterio cerrado para la selección de episodios, sino que también se han considerado como episodios con altos niveles de ozono troposférico aquellos períodos en los cuales se observaban ascensos acusados de los niveles de ozono, independientemente de la concentración de inmisión alcanzada. Esta flexibilidad en el criterio de selección de los episodios permite aumentar el número de episodios de estudio, evitando que se desprecien períodos con valores máximos ligeramente inferiores al límite elegido y en los que es patente el incremento de la inmisión de ozono troposférico.

Una vez identificados los períodos en los cuales se superaba el umbral establecido, el siguiente paso consistió en delimitar su duración. Se ha seguido un criterio de mínimos, estableciendo una duración temporal mínima de siete días, para disponer de una etapa previa y otra posterior al período crítico afectado por los máximos de inmisión de ozono troposférico. Esta ampliación de la duración del episodio puntual se hace necesaria para el análisis, ya que las reacciones fotoquímicas de formación y destrucción del ozono en la atmósfera se caracterizan por un tiempo de reacción y equilibrio fotoquímico de horas a semanas (Seinfeld y Pandis, 1998), con lo cual es importante disponer de este espacio temporal antes y después del episodio en sí, facilitando de este modo la realización de un análisis correcto de las posibles causas. La duración máxima de los episodios no se ha restringido, ya que en algunos casos no existían evidencias de la renovación de la masa aérea, lo que hacía necesario considerar episodios de duración superior a las dos semanas. Aún así, salvo casos excepcionales, los episodios no suelen superar los diez días de duración, coincidiendo con la persistencia típica de las situaciones de anticiclón de bloqueo afectando al noroeste peninsular, y su finalización está asociada con frecuencia a la entrada de frentes desde el oeste.



## **2.2 Análisis de la climatología sinóptica.**

La climatología sinóptica proporciona un marco adecuado para interpretar las variaciones regionales de concentración del ozono troposférico, dada la dependencia de la producción, transporte y consumo del citado contaminante atmosférico con respecto a la meteorología dominante (Yarnal, 1993).

La utilización de datos sinópticos en el análisis de los episodios con elevados niveles de ozono troposférico es clave para alcanzar un triple objetivo:

- Establecimiento de una clasificación de patrones de circulación directamente relacionados con el aumento de la inmisión de ozono troposférico en el noroeste de Galicia, lo cual podría permitir la predicción de altos niveles de ozono con antelación suficiente para mejorar la gestión de situaciones sanitarias de riesgo
- Estudio de las situaciones sinópticas que conducen a la generación “in situ” de niveles elevados de ozono en la región de estudio
- Estudio de los fenómenos de transporte de ozono troposférico a larga distancia, en concreto determinación de posibles áreas fuente de ozono y precursores

En este caso, el análisis de las condiciones sinópticas en que se desarrolla cada episodio permite establecer una caracterización de las situaciones sinópticas que tienen mayor influencia para los episodios de inmisión de ozono troposférico dentro de las más habituales en la península Ibérica y en la Comunidad Gallega en particular.

A continuación se describe el tipo de análisis sinóptico realizado para cada uno de los episodios identificados, incluyendo una breve introducción al análisis sinóptico de variables medioambientales, centrado en este caso en los niveles de ozono troposférico.

Una de las características del clima, definido como “síntesis del conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, en un área determinada, correspondiente a un período de tiempo lo suficientemente largo para que sea geográficamente representativo” (Font-Tullos, 2000), son los estados y evoluciones del tiempo, tal y como se manifiestan en los mapas sinópticos, que a su vez ejercen gran influencia sobre una amplia gama de problemas medioambientales. Como el análisis de esta sucesión de estados y de su evolución es el objetivo de la Climatología Sinóptica, esta disciplina relaciona la circulación atmosférica y las variables medioambientales en superficie, a nivel regional, constituyendo una herramienta de gran utilidad para ayudar a comprender las fluctuaciones de los niveles de ozono troposférico en superficie.

La aplicación de datos sinópticos al análisis de variables medioambientales, para establecer las relaciones entre ambos, puede llevarse a cabo desde dos puntos de partida diferentes, denominados “circulación - medio ambiente” o “medio ambiente - circulación”, según Yarnal (Yarnal, 1993).

La primera aproximación, “circulación – medio ambiente”, parte de una clasificación sinóptica preexistente para la región de estudio, para comprobar, a posteriori, como se relaciona cada uno de esos tipos sinópticos previamente establecidos con el comportamiento de la variable medioambiental analizada. Por el contrario, la segunda aproximación, “medio ambiente - circulación”, identifica los tipos de circulación atmosférica asociados a la variable de estudio, de modo que inicialmente se delimitan los períodos de análisis atendiendo a los valores ambientales de interés, y a continuación se caracterizan dichos períodos con el tipo de tiempo que le corresponde, según la clasificación sinóptica elegida o desarrollada para la ocasión.

Una clasificación sinóptica se define como una “tipificación de estados de la atmósfera a escala sinóptica” (Ribalaygua y Borén, 1996), aunque se debe distinguir entre situación sinóptica y tipo de tiempo, de manera que una determinada situación sinóptica afectando a toda la España peninsular produce con frecuencia varios tipos de tiempo, dependiendo de la región o lugar, que pueden diferir notablemente entre sí (Martín Vide, 1991).

La selección del tipo de clasificación sinóptica a emplear también permite varias opciones. Una primera distinción afecta a la metodología de agrupación de los datos sinópticos usados, distinguiéndose entre “clasificaciones subjetivas” y “clasificaciones objetivas”. Las clasificaciones subjetivas o manuales surgen de la experiencia acumulada durante años en el estudio de las diferentes situaciones meteorológicas sobre una región, siendo el “experto” el encargado de detectar las similitudes entre ellas hasta tipificar una serie de patrones. Las clasificaciones objetivas son clasificaciones automatizadas basadas en múltiples algoritmos numéricos, que extraen las características principales de los datos disponibles y efectúan comparaciones para agrupar los diferentes tipos en un número determinado de grupos, en función de su nivel de semejanza. Las clasificaciones manuales adolecen de una serie de problemas relacionados con su carácter subjetivo, como la imposibilidad de recoger todas las posibles situaciones en una clasificación rigurosamente precisa, la arbitrariedad en el establecimiento de los límites entre configuraciones debido a su carácter continuo, la variabilidad anual de los tipos, etc. Las clasificaciones objetivas surgieron para solventar estas desventajas, pero todavía están más extendidas las primeras, debido a la dificultad que supone el uso intensivo de recursos informáticos para obtener clasificaciones objetivas.

Existen múltiples trabajos en la bibliografía científica que examinan la relación entre situaciones sinópticas y patrones regionales de ozono troposférico, aplicando los métodos anteriores de la Climatología Sinóptica. Entre los estudios basados en clasificaciones sinópticas subjetivas y/o manuales, destacan, entre otros, los trabajos de Comrie (Comrie, 1992; Comrie y Yarnal, 1992), en Pennsylvania, O'Hare (O'Hare y Wilby, 1995), que aplica los tipos sinópticos de Lamb al Reino Unido e Irlanda, Hanna y Chang (Hanna y Chang, 1995), que caracterizan sinópticamente episodios con elevadas concentraciones de ozono en el entorno del lago Michigan y Dayan (Dayan y Levy, 2002), que usa la aproximación “medio ambiente - circulación” para establecer patrones sinópticos en días con altos niveles de ozono en Israel. Otros proyectos más recientes emplean clasificaciones automatizadas, basadas en variados métodos estadísticos, como suma de cuadrados (McKendry, 1994) o análisis de componentes principales y técnicas de agrupación por conjuntos o *clustering* (Eder et al., 1994; Hart et al., 2006; Rohli et al., 2004).

En la península Ibérica, la mayor parte de los estudios de este tipo se han centrado en la región mediterránea y en la meseta castellana, áreas en las cuales el ozono troposférico supone un problema de mayor magnitud, al alcanzarse concentraciones superiores debido a su situación geográfica y características morfológicas. De acuerdo con su enfoque sinóptico pueden resaltarse los trabajos de Castell y Mantilla (Castell y Mantilla, 2003), que estudian la tipología de las situaciones sinópticas y meteorológicas que conducen a cada tipo de situación de niveles altos de ozono en la vertiente mediterráneo-levantina, según un método de clasificación manual y subjetivo, García (García et al., 2005), que relaciona valores de inmisión de ozono en el la meseta norte castellana con sus correspondientes configuraciones sinópticas, diferenciando la estación del año y Fernández García, en colaboración con Rasilla (Fernández García, 2001), que considera seis situaciones sinópticas definidas sobre la Península Ibérica, mediante un análisis de componentes principales seguido de un análisis de agrupamiento *clustering*, y las relaciona con las concentración atmosférica de los contaminantes más representativos del área de Madrid, con especial atención al ozono. En otras ocasiones, el estudio de las situaciones sinópticas en relación con la contaminación por ozono troposférico está orientado a la determinación de las rutas de transporte que originan eventos con altos niveles del contaminante, como en el trabajo de Rodríguez (Rodríguez et al., 2004) centrado en las Islas Canarias. Por último, los estudios geográficamente más próximos a nuestra zona de análisis son los realizados por Hernández (Hernández et al., 2004), sobre la bahía de Santander, Albizuri (Albizuri, 2003), centrado en el País Vasco: ambos obtienen los tipos de circulación representativos mediante procedimientos de clasificación automáticos, como el análisis multivariante tipo *clustering*, relacionándolos, en el primer caso, con la concentración de contaminantes atmosféricos, incluido el ozono, y con patrones dispersivos para episodios de altos niveles de ozono, en el desarrollo de Albizuri.

La diversidad de catálogos de clasificación sinóptica en la península Ibérica es elevada, debido a la variada gama de influencias de dinámica atmosférica que gobiernan estas latitudes y a la compleja configuración geomorfológica ibérica (Martín-Vide, 2001): la situación peninsular, entre el cinturón de altas presiones subtropicales, al sur y la franja de circulación del oeste, al

norte, favorece la existencia de múltiples influencias atmosféricas sobre la configuración sinóptica, pudiendo concurrir dos situaciones atmosféricas totalmente opuestas sobre la península Ibérica. Entre los catálogos subjetivos más relevantes en la Climatología Sinóptica peninsular destacan, según Fernández (Fernández et al., 2003), los propuestos por Linés (Linés, 1981), con 25 tipos a partir de datos en 300 hPa, Font Tullot (Font Tullot, 1983), con 23 tipos que combinan superficie y 500 hPa, Martín Vide (Martín Vide, 1991), con 16 tipos usando los mismos niveles, y Capel Molina (Capel Molina, 2000), con 18 tipos basados en superficie y en 500 ó 300 hPa. En cuanto a trabajos utilizando clasificaciones sinópticas de la península Ibérica utilizando técnicas automáticas, Jorba (Jorbá, 2005) cita, entre otros, a Spellman (Spellman, 2000) y Martín-Vide (Martín-Vide, 2002), siendo uno de los más recientes el trabajo de Rasilla (Rasilla, 2003).

El análisis sinóptico de los episodios seleccionados en este trabajo se ha desarrollado mediante la utilización de la aproximación “medio ambiente – circulación”, identificando primero los períodos y estableciendo posteriormente la circulación atmosférica asociada a cada uno de ellos. Este enfoque es el más adecuado a nuestro problema, al estar centrado únicamente en aquellas configuraciones que conllevan altos niveles de inmisión de ozono, y ha sido seguido por varios autores, como Dayan (Dayan y Levy, 2002), Hanna (Hanna y Chang, 1995), Castell (Castell y Mantilla, 2003), etc.

La clasificación sinóptica empleada para la determinación de “patrones sinópticos” de los episodios es la clasificación manual y subjetiva, publicada por Font Tullot en 1983 (Font Tullot, 1983). La elección de una clasificación de tipo subjetivo está relacionada con el tipo de datos disponibles (mapas sinópticos sin digitalizar) y con la mayor complejidad que deriva de la aplicación de clasificaciones objetivas, debido al tratamiento informático requerido. Estudios como el de Yarnal (Yarnal, 1993) avalan el uso de métodos manuales en el análisis de patrones sinópticos relacionados con niveles superficiales de ozono troposférico, con resultados ligeramente superiores a los ofrecidos por clasificaciones automatizadas.

La clasificación sinóptica de Font Tullot para la península Ibérica distingue 23 tipos sinópticos diferentes, en función del tipo de flujo (anticiclónico o ciclónico), incluyendo situaciones no advectivas. El criterio de clasificación se centra en las variaciones del vórtice circumpolar (variaciones de los vientos generales del Oeste), con una primera división basada en la contracción y expansión del vórtice, y una segunda división determinada por su grado de ondulación. La metodología de clasificación anterior parte de mapas de superficie y topografías a 500 hPa. La citada clasificación de Font Tullot es una de las clasificaciones manuales más representativas en España, junto con otros catálogos sinópticos de la Península, como los anteriormente citados de Capel Molina (Capel Molina, 2000), Martín Vide (Martín Vide, 1991), Linés (Linés, 1981), etc. Sin embargo, Font Tullot recoge un número ligeramente mayor de situaciones sinópticas anticiclónicas (favorables para la generación de ozono troposférico), y se basa en mapas de superficie y topografías a 500 hPa, datos de los cuales es sencillo disponer. Estas dos últimas cuestiones son las que han decantado su elección para identificar los conjuntos principales de circulación atmosférica ligados a los episodios con altos niveles de ozono previamente identificados, aunque cualquiera de las clasificaciones citadas sería igualmente válida.

Los tipos de tiempo atmosférico, según Font Tullot, se entienden como “la distribución particular de los sistemas de presión de las masas de aire sobre una región geográfica especificada, asociados con típicas características generales del tiempo atmosférico”. La identificación de los tipos de tiempo no es fácil, dada la complejidad y variabilidad inherentes a la propia naturaleza de la circulación general de la atmósfera, que hace que las distribuciones de los sistemas de presión sobre un área determinada no se repitan exactamente, apareciendo mapas sinópticos similares pero nunca idénticos. Además, en áreas con condiciones climáticas tan complejas como la península Ibérica, puede ocurrir que a distribuciones aparentemente similares les correspondan distintas características del tiempo. En consecuencia, cualquiera que sea el criterio que se siga en la identificación de los tipos de tiempo siempre habrá un cierto grado de subjetividad.

La clasificación de Font Tullot se basa en los dos criterios citados anteriormente, y relacionados ambos con las variaciones del vórtice circumpolar, debido a la dependencia de las

características generales del tiempo atmosférico con el estado de la circulación general, dirigida por estas variaciones:

1) Contracción y expansión del vórtice, que permite definir tres grupos principales:

- I. Circulación superior del Oeste a latitudes normales
- II. Circulación superior del Oeste a latitudes altas
- III. Circulación superior del Oeste a latitudes bajas

2) Grado de ondulación del vórtice (figura 2.1), aplicado específicamente al tipo I:

- Z. Circulación zonal
- M. Circulación meridiana
- D. Depresión fría, claramente desprendida del vórtice

La figura 2.1 muestra la posición de la península Ibérica con respecto a dos de los tres tipos de circulación citados en el segundo criterio, correspondientes a las variaciones del vórtice circumpolar, esquematizadas mediante las líneas de flujo de viento máximo. La línea continua de trazo grueso indica la circulación zonal, con predominio de la componente Oeste del viento, mientras las otras dos líneas (continua fina y discontinua) se ajustan a la circulación meridiana, con predominio de las componente Norte y Sur, respectivamente. El primer criterio hace referencia a la posición latitudinal del vórtice, debido a su expansión y contracción, representada en la figura por la línea de viento máximo, colocada en este caso en sus latitudes habituales.

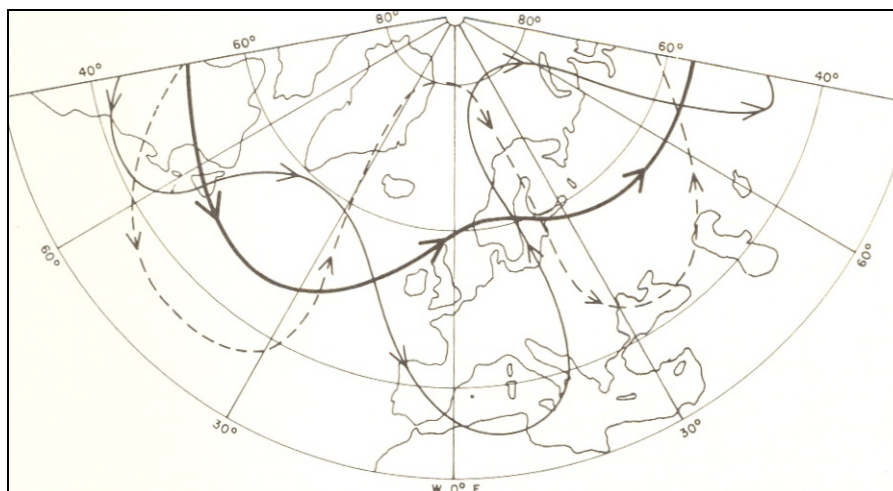


Figura 2.1: "Variaciones del vórtice circumpolar, según la clasificación rusa debida a Girs y Wangenheim. Fuente: Font-Tulot, 1983"

Siguiendo estos criterios, Font Tullo identifica veintitrés tipos de tiempo en la península Ibérica, correspondientes a situaciones meteorológicas cuyas características generales permanecen al menos tres días, aunque la existencia entre ellos de periodos de transición, más o menos largos, dificulta su clasificación más allá de las divisiones mencionadas en grupos y subgrupos. La clasificación y descripción resumida de las veintitrés situaciones seleccionadas figura en la tabla 2.1.

Las masas de aire dominantes en cada situación sinóptica, recogidas en la última columna de la tabla anterior, además de caracterizar los tipos de tiempo que acompañan a las condiciones sinópticas establecidas, sirven de ayuda para identificar el origen de los posibles episodios de ozono troposférico, al establecer el recorrido de las masas de aire que alcanzan la península Ibérica. La figura 2.2 recoge la procedencia y trayectoria de dichas masas.

Indicativo	Descripción	Masas de aire dominantes
1.I.Z	Altas presiones en el Atlántico subtropical	mT (sub)
2.I.Z	Anticiclón subtropical atlántico	mP
3.I.Z	Anticiclón atlántico-mediterráneo	mT (sub)
4.I.Z.i	Anticiclón peninsular	Ibérica fría
5.I.Z.e	Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular	cT, mT (sub)
6.I.M.i	Depresión del Golfo de Vizcaya	mT, mP
7.I.M	Depresión británica	mP, mA
8.I.M.e	Anticiclón atlántico y depresión térmica peninsular	cT
9.I.M.e	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa	Ibérica cálida
10.I.M	Depresión del Golfo de Génova	cP, mP
11.I.M.i	Anticiclón centroeuropeo	mT, cT
12.I.D	Depresión atlántico-ibérica	mT, mP
13.I.D	Depresión del Golfo de Cádiz	mP
14.I.D	Depresión balear	Mediterránea
15.I.D.i	Anticiclón ruso	cP
16.I.D.i	Anticiclón británico-escandinavo	cP, Mediterránea
17.I.D.i	Anticiclón atlántico-europeo	cT, Mediterránea
18.I.D	Vaguada ibero-africana	mT (sub)
19.II.i	Depresión fría peninsular, de invierno	mT (sub)
20.II.e	Depresión fría peninsular, de verano	mT (sub)
21.II	Pantano barométrico	mT (sub)
22.III.i	Intensa circulación zonal a bajas latitudes	mT (sub)
23.III.i	Circulación ondulada a bajas latitudes	mT (sub), mP

Tabla 2.1: Clasificación sinóptica de Font Tullot, mostrando las 23 situaciones sinópticas identificadas para la península Ibérica. Los tipos preferentemente invernales o primaverales están señalizados con una *i*, mientras que los fundamentalmente estivales lo están con una *e* (adaptado de Font-Tullot, 1983)”

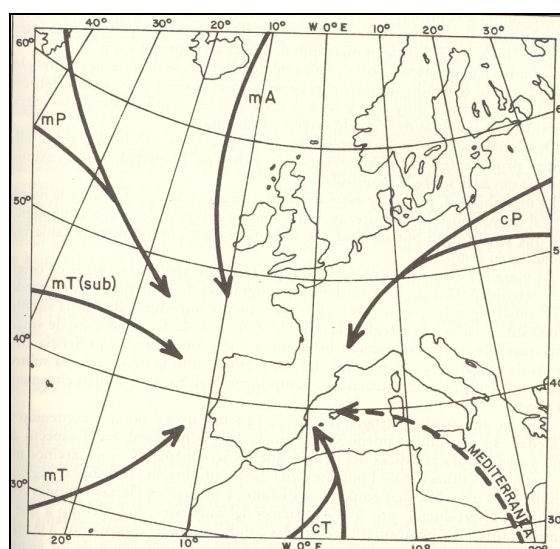


Figura 2.2: “Trayectoria de las masas de aire que llegan a la Península. Las letras minúsculas indican su origen (*m* de “marítimo” y *c* de “continental”), y las mayúsculas su carácter térmico (*T* “cálida o tropical”, *P* “fría polar” y *A* “fría ártica”. Fuente: Font-Tullot, 1983”

En cuanto al análisis sinóptico de los episodios identificados, éste se inicia con un estudio preliminar de las condiciones sinópticas de los mismos, estudiando individualmente las jornadas de cada episodio (apartado 3.5.2), a partir de los mapas de superficie y topografías a 500 hPa, correspondientes al reanálisis del National Center for Environmental Prediction (Kalnay et al., 1996). Se han utilizado también mapas de temperatura a 850 hPa, con el mismo origen, como apoyo a la caracterización sinóptica. Estos reanálisis han sido recogidos por el instituto alemán Wetterzentrale y pueden consultarse en su portal de Internet (Wetterzentrale, 2010).

A continuación, siguiendo la citada clasificación sinóptica de Font Tullot, se ha determinado el tipo de circulación sinóptica propia de cada uno de los episodios identificados, según se muestra en el apartado 3.5.2 del capítulo 3. Esta asociación se ha realizado considerando únicamente la situación sinóptica de la jornada que presenta el máximo valor horario de inmisión en cada episodio, tratándose por tanto de una “clasificación estática”, en el sentido que obvia la dinámica de las condiciones sinópticas: generalmente, en la sucesión de los distintos tipos de tiempo no existe ni regularidad ni continuidad, observándose entre ellos períodos de transición durante los cuales la rapidez e irregularidad con que varían las características del tiempo atmosférico dificulta su clasificación. A pesar de esta limitación, los tipos de tiempo identificados por Font Tullot se corresponden con situaciones meteorológicas que se mantienen en sus rasgos generales durante tres o más días (Font-Tullot, 1983), con lo cual el análisis se considera igualmente válido.

### **2.3 Análisis de las condiciones meteorológicas locales.**

Las variables meteorológicas conforman uno de los tres grandes grupos de factores que regulan la contaminación atmosférica a escala local o regional, junto con los factores orográficos y las fuentes de precursores y/o contaminantes primarios.

En episodios de alta concentración de ozono, que implican acumulación de contaminantes, los procesos meteorológicos son factores dominantes por una doble razón:

- a) las reacciones fotoquímicas, directamente influenciados por las condiciones meteorológicas (radiación solar, temperatura, velocidad de viento, humedad relativa), son la base de las reacciones de formación y destrucción de ozono en la capa límite (Chevenez y Jensen, 2001)
- b) los fenómenos meteorológicos de carácter local, como inversiones térmicas o vientos locales, incluyendo regímenes de brisas marinas (Andronopoulos et al., 2000; Millán et al., 2000; Hastie et al., 1999), vientos de valle-montaña (McKendry et al., 1998; Rappenglück et al., 2000; Salmond y McKendry, 2002), vientos orográficos (Baumann et al., 2001), etc., desempeñan un importante papel sobre todo en áreas montañosas o en zonas costeras, al afectar a la dispersión, transporte y acumulación del ozono troposférico (temperatura, dirección e intensidad de viento, precipitación), determinando en muchos casos los niveles de ozono troposférico en superficie.

Por otra parte, el ozono superficial medido por las estaciones de una red de vigilancia puede tener orígenes diferentes: origen estratosférico (Colette y Ancellet, 2005; Holton et al., 1996), debido al intercambio estratosfera-troposfera, y formación fotoquímica a partir de precursores naturales y antropogénicos. Las condiciones meteorológicas, reflejo de la situación sinóptica imperante, tienen un gran impacto en las concentraciones de ozono originadas bajo ambas circunstancias, bien regulando el marcado ciclo estacional y diario de la inmisión a través de su influencia en las reacciones fotoquímicas de formación (Millán et al., 2000), o bien debido a la relación de las vaguadas y sus frentes asociados con las intrusiones de aire estratosférico rico en ozono (Kunz y Speth, 1997). De aquí deriva la existencia de múltiples métodos/índices paramétricos para la predicción de inmisión de ozono troposférico basados en medidas meteorológicas (Burrows et al., 1995; Chevenez y Jensen, 2001), muchos de ellos revisados y analizados por Thompson (Thompson et al., 2001). En nuestro caso, la recopilación y análisis de las medidas meteorológicas no se relaciona con la obtención de índices predictivos, pero sí

resulta de gran ayuda a la hora de interpretar las posibles causas de los episodios de ozono identificados.

El estudio de la meteorología local permite la realización de un análisis más exhaustivo de la influencia meteorológica sobre los episodios de contaminación, al tener en cuenta los citados efectos locales que los mapas sinópticos no son capaces de reproducir, cobrando este aspecto una gran importancia en un terreno de orografía tan compleja como el norte de la Comunidad Gallega. En este estudio se han utilizado dos tipos de fuentes: series de medidas históricas directas, correspondientes a seis estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes y a radiosondeos meteorológicos, y representaciones gráficas de históricos de medidas meteorológicas en estaciones de Europa Occidental, recogidos en el instituto alemán Wetterzentrale (Wetterzentrale, 2010), describiéndose ambas a continuación.

#### a) Medidas meteorológicas directas en el norte de Galicia

Este análisis de la meteorología local se ha centrado en las medidas superficiales recogidas en cinco estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes (B1-A Magdalena, B2-Louseiras, C9-Mourence, F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova), y en las variables meteorológicas registradas en la torre meteorológica de 80 metros de altura, en la estación D1- A Mourela, perteneciente a la misma red. Todas las estaciones son automáticas, recogiendo medidas en continuo a lo largo de todo el año, tanto variables meteorológicas como datos de inmisión para varios contaminantes, entre ellos ozono y óxidos de nitrógeno.

La tabla 2.2 recoge la situación y otras características de interés para las estaciones citadas, así como para los dos puntos de lanzamiento de los radiosondeos meteorológicos utilizados.

Estación	Coordenada X (UTM) (km)	Coordenada Y (UTM) (km)	Altitud (ASL) (m)	Distancia al mar (km)
B1 - A Magdalena	593.3	4811.4	363.0	28.0
B2 - Louseiras	601.8	4821.1	540.0	18.0
C9 - Mourence	606.0	4796.4	465.0	41.0
F2 - Fraga Redonda	581.9	4806.3	480.0	16.0
G2 - Vilanova	578.5	4822.9	290.0	11.0
D1 - A Mourela	592.7	4809.5	450.0	30.0
A Coruña (RS)	547.0	4802.1	67.0	0.1
Santiago (RS)	536.1	4747.2	252.0	29.0

Tabla 2.2: Estaciones de monitorización meteorológica y puntos de radiosondeo usados en este estudio. Las coordenadas son Universal Transverse Mercator (UTM), huso 29. ASL indica altura sobre el nivel del mar. RS corresponde a radiosondeo.

Los parámetros analizados son datos horarios de temperatura a 2 metros, velocidad y dirección de viento a 10 metros, en las cinco estaciones citadas (B1, B2, C9, F2 y G2), y temperatura a 10, 30 y 80 metros, velocidad y dirección de viento a 10 y 80 m, precipitación, humedad relativa y radiación solar global, en la estación D1.

Se ha realizado un análisis cualitativo para cada episodio, centrado fundamentalmente en la descripción de las series térmicas, para confirmar la relación entre altos niveles de ozono y elevados registros de temperatura diurna, y de las series de viento, con el objetivo de determinar efectos locales, como brisas marinas, y de establecer posibles direcciones de transporte de precursores y ozono troposférico alóctono.

Los datos de precipitación e insolación han servido como apoyo para definir el comienzo y final de cada episodio, teniendo en cuenta que la llegada de frentes a la Comunidad Gallega, generalmente asociados a vientos fuertes, nubosidad abundante y lluvia intensa causan la limpieza efectiva de la troposfera, liberándola de contaminantes, en especial de ozono, dado su

generación fotoquímica. La radiación solar total también representa un papel importante en la evolución de los niveles de ozono, dado su carácter fotoquímico, y permite además la detección de episodios de nieblas, muy característicos de nuestra zona de estudio.

Para completar el análisis con medidas meteorológicas en altura, se ha recurrido al radiosondeo meteorológico realizado operacionalmente por el Instituto Nacional de Meteorología en el Centro Meteorológico de A Coruña, cuyos datos se han obtenido a través de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos. Los radiosondeos operados por Meteogalicia (Xunta de Galicia, Consellería de Medio Ambiente) en la Estación de Observación Atmosférica de Santiago de Compostela han sido también utilizados, en aquellos periodos en que se encontraban disponibles.

Las medidas derivadas de los radiosondeos que han sido usadas en este análisis son los perfiles verticales de temperatura potencial y de viento (velocidad y dirección), con el objetivo de observar características de la capa límite atmosférica relevantes en episodios de contaminación atmosférica, como la altura de capa de mezcla o la existencia de posibles inversiones térmicas.

#### b) Mapas de medidas meteorológicas sobre Europa Occidental

Las observaciones regionales de parámetros atmosféricos representativos sobre Europa Occidental en general, y sobre la península Ibérica en particular, han sido empleados para ampliar el campo de acción y poner en relación la meteorología local con un área mayor, estableciendo un puente con la meteorología sinóptica: las condiciones meteorológicas y sinópticas, que afectan a procesos fotoquímicos y al transporte de contaminantes, tienden a afectar a territorios de gran extensión, lo cual significa que la variabilidad del ozono sigue patrones homogéneos en dichas áreas (O'Hare, 1997; Spellman, 1998).

Las medidas recopiladas en los mapas empleados corresponden a datos de temperatura, velocidad y dirección de viento, precipitación, simbología meteorológica (nieblas, tormentas, granizo, cielo despejado, nubosidad, etc.) registrados cada seis horas (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC y 18 UTC) en un gran número de estaciones meteorológicas de Europa Occidental.

El uso de estos mapas permite conocer la situación meteorológica en zonas adyacentes a la zona de estudio, aportando información relevante para entender la evolución de los episodios (por ejemplo, nieblas litorales, lluvias en posibles áreas de emisión de precursores, nubosidad, etc.), lo cual facilita su caracterización y análisis. En ocasiones, para completar o ampliar esta información, se recogieron datos numéricos de las estaciones meteorológicas de Meteogalicia (Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia).

## **2.4 Análisis de concentraciones de inmisión de ozono troposférico.**

Los episodios con altos niveles de ozono troposférico se determinaron a partir de las medidas horarias de ozono registradas en las cinco estaciones ya citadas de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes (B1, B2, C9, F2 y G2), según el criterio explicado en el apartado 2.1. Se estudiaron también las concentraciones horarias de los precursores primarios básicos, el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), recogidas en las mismas estaciones de monitorización. Sería interesante haber estudiado las concentraciones de otros precursores primarios, como los compuestos orgánicos volátiles (COVs) de naturaleza biogénica y antropogénica, dado su importante papel en las reacciones de formación de ozono (Seinfeld y Pandis, 1998), pero la carencia de datos en las redes de monitorización consideradas lo ha impedido.

### **2.4.1 Clasificación de las estaciones de monitorización de la calidad del aire**

El análisis episódico de las series temporales de ozono troposférico y óxidos de nitrógeno debe tener en cuenta información relacionada con la localización de las estaciones de monitorización (orografía, uso de suelos, distribución poblacional, distancia a vías de comunicación, etc) para que los valores de inmisión registrados, tanto de ozono como de precursores, sean



representativos del área. Por ello se hace imprescindible disponer de una correcta caracterización y clasificación de las estaciones de recogida de datos.

Las estaciones de medida pueden ser clasificadas en función de los niveles de los contaminantes que miden, de los objetivos de la medida (protección de la vegetación o de la salud, investigación), o de acuerdo con el tipo de entorno que la rodea (European Union, 1999b). Siguiendo este último criterio, en la actualidad existen en Europa diferentes categorías para clasificar las estaciones de medida de la calidad del aire:

- a) La Decisión 97/101/CE, llamada “Eol, Criterios de intercambio de información acerca de la calidad del aire” (European Union, 1997), propone una clasificación de nueve categorías basada en un cruce de dos criterios: tipo de zona (urbana, suburbana y rural) y tipo de fuentes de emisión predominantes (tráfico, industria y entorno de fondo).
- b) Una segunda clasificación deriva del ETC-AQ (Centro Europeo de Calidad de Aire), como parte del proyecto “EUROAIRNET” (European Union, 1999), estableciendo subclases para las estaciones de fondo (urbana/suburbana de fondo, estación de fondo próxima a ciudad, estación regional y estación remota), mientras mantiene las clases de estación de tráfico y estación industrial.
- c) Las últimas clasificaciones proceden de dos directivas sobre el ozono: la Directiva 92/72/CE (European Union, 1992), que establece los grupos “estación de calle”, “estación urbana” y “estación rural”, y la Directiva 2002/3/CE (European Union, 2002), con estaciones rurales de fondo, rurales, suburbanas y urbanas.

Las cinco estaciones de la Red Gallega de Calidad de Aire (B1, B2, C9, F2 y G2), cuyos datos conforman la base de este estudio, se han caracterizado siguiendo la Directiva 2002/3/CE, según se muestra en el apartado 3.3 del capítulo 3. Debe destacarse que la Directiva 2002/3/CE ha sido derogada recientemente por la Directiva 2008/50/EC, del 21 de Mayo de 2008, “relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa” (European Union, 2008), pero esta última mantiene el mismo criterio de clasificación de estaciones de medida de ozono.

#### *2.4.2 Estudio de concentraciones de inmisión de ozono troposférico y precursores primarios*

El siguiente paso, una vez establecidos todos los episodios objeto de estudio y caracterizadas las estaciones, consistió en la realización de un análisis preliminar cualitativo de las medidas de calidad de aire en estas estaciones: estimación de la distribución espacial y temporal de las concentraciones, determinación del tipo de patrones generales de ozono en cada estación y comparación entre estaciones, clasificación de estaciones según el tipo de patrón de ozono, estudio cualitativo de los valores registrados de precursores primarios ( $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) y correlación con algunos datos meteorológicos, como precipitación y radiación solar.

Tras la realización de este estudio previo, se analizó por separado cada episodio, relacionando los valores de inmisión de ozono y sus precursores con las variables meteorológicas registradas en las mismas estaciones (temperatura y viento fundamentalmente). El análisis episódico de concentraciones se centra en determinar:

- a) Patrón de evolución temporal de las concentraciones de ozono troposférico en cada estación: intervalo temporal en el cual se alcanza el máximo diario y episódico, existencia de repuntes de inmisión o de máximos nocturnos, niveles de ozono durante la noche, etc.
- b) Relación de las concentraciones de ozono con las concentraciones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$ ) para cada estación
- c) Comparación de las series de concentraciones (ozono y óxidos de nitrógeno) entre las cinco estaciones, para determinar la distribución espacial y temporal de las concentraciones de ozono y precursores (posibles diferencias entre estaciones dada su distinta localización)

- d) Relación de las concentraciones de ozono con la temperatura máxima diaria y con las series térmicas nocturnas (inversiones térmicas, fenómenos de estabilidad estática, etc.)
- e) Relación de las concentraciones de ozono con la dirección y velocidad de viento, con especial atención a fenómenos de viento local, como el frecuente régimen de brisa marina

Este estudio episódico centrado en la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes es de gran ayuda para detectar la generación local de ozono, muy influenciada por la meteorología propia del área de estudio, como ya se ha indicado, aunque también puede aportar datos sobre el posible transporte regional alóctono, en función de algunas evidencias como la existencia de masas de ozono envejecido en capas altas de la atmósfera.

Una vez definidos los episodios y realizado el estudio local anterior directamente sobre las cinco estaciones del noroeste de la provincia de A Coruña, el análisis episódico se completa a nivel regional usando los datos recogidos en otras estaciones de monitorización a mayor distancia del área de estudio. Para ello se han utilizado datos horarios de inmisión de ozono y precursores nitrogenados registrados en zonas limítrofes: otras estaciones de carácter rural pertenecientes a la Red Gallega de Control de la Calidad de Aire, estaciones rurales de la Red de Contaminación Atmosférica de Castilla-León, de la Rede de Qualidade do Ar do Norte de Portugal y estaciones EMEP de la Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Residual.

Las series de ozono troposférico y precursores primarios (óxidos de nitrógeno) en estas redes próximas se estudian en relación con los datos recogidos en las cinco estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes, comparándolos para obtener una visión general de los niveles de ozono troposférico a escala regional en el entorno de la provincia de A Coruña. El objetivo de este análisis es conocer los niveles típicos de ozono y precursores en las regiones adyacentes al área de estudio durante los episodios identificados, al ser posibles orígenes del transporte regional de ozono troposférico hacia el norte de A Coruña, y el método es muy similar al análisis episódico realizado sobre las estaciones de la Red de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes, basado en los puntos siguientes:

- Obtención del patrón de evolución temporal de las concentraciones de ozono troposférico en cada estación, pero siempre en relación con las series de ozono troposférico del área de estudio
- Comparación de las series de concentraciones (ozono y óxidos de nitrógeno) de las estaciones de estas redes limítrofes con las series de las estaciones del área de estudio, con especial incidencia en la magnitud del máximo diario y en los valores medios diarios, para determinar la distribución espacial y temporal de las concentraciones de ozono y precursores en el entorno regional de la zona de análisis
- Estudio de las condiciones sinópticas dominantes en los territorios donde se ubican estas redes auxiliares, para determinar las posibles direcciones de arrastre de las masas de ozono registradas en estas estaciones

No se ha realizado un estudio meteorológico de carácter local en estas estaciones vecinas, a diferencia del caso anterior, pues el objetivo no se centra en la generación local de ozono en esas zonas, sino en profundizar en el conocimiento de los mecanismos de transporte regional que podrían afectar a la zona de estudio partiendo de estas áreas próximas. Por ello se ha utilizado la meteorología sinóptica descrita en el apartado anterior (mapas de medidas meteorológicas sobre Europa Occidental y reanálisis NCEP), atendiendo principalmente a la intensidad y dirección del viento y de la circulación atmosférica en altura. Es decir, el análisis de estos registros de inmisión permite obtener datos sobre el transporte alóctono de ozono hacia el norte de Galicia desde esas áreas, del mismo modo que el análisis de los datos de las estaciones situadas en el área de estudio nos proporcionaba información sobre la formación autóctona de ozono.

## **2.5 Análisis de simulaciones meteorológicas y de calidad del aire**

Las redes de monitorización permiten la determinación de contaminantes primarios y secundarios en una escala local (alrededor de 10 km) o incluso regional (sobre unos pocos cientos de kilómetros). Sin embargo, los resultados procedentes de la modelización permiten la estimación de contaminantes a escalas mucho mayores. Por otro lado, las redes de monitorización proporcionan información sobre la situación de la calidad del aire, pero no indican las razones de que se haya alcanzado dicha situación. La modelización constituye en este punto una poderosa herramienta para integrar varias fuentes de información útil para conocer las causas de la inmisión registrada (emisiones, datos meteorológicos, química atmosférica y datos de calidad de aire), y proporciona un mayor conocimiento sobre cuestiones como la procedencia de los elevados niveles de ozono durante un episodio, o la importancia del transporte a larga distancia durante el mismo.

Una vez analizadas las condiciones sinópticas y regionales para cada episodio seleccionado, y conocida la distribución espacio-temporal de la inmisión de ozono en la zona de estudio y regiones limítrofes, la realización de simulaciones de calidad de aire permite la integración de ambos factores, aportando información sobre el origen y la evolución de la contaminación por ozono en cada episodio.

Además de las simulaciones de calidad de aire, las simulaciones meteorológicas también aportan datos valiosos para establecer el origen de los valores de ozono troposférico medidos por la red de monitorización de calidad del aire, pues los procesos de transporte y formación fotoquímica de los contaminantes presentes en la atmósfera dependen en gran medida de las condiciones meteorológicas.

De acuerdo con estas bases, en la metodología seguida para el estudio de los episodios de ozono identificados se han empleado ambos tipos de modelización, tanto simulaciones meteorológicas como de calidad de aire, describiéndose a continuación su utilización. En el caso de las simulaciones de calidad de aire, el análisis se ha basado en simulaciones a escala europea previamente existentes, de modo que la información extraída se relaciona únicamente con fenómenos de transporte a escala continental.

### **2.5.1 Simulaciones meteorológicas**

La modelización meteorológica es imprescindible para la reconstrucción de los campos meteorológicos de entrada a los modelos de dispersión y de calidad de aire, pero ésta no es la única información relevante a efectos de análisis de la contaminación fotoquímica: las simulaciones meteorológicas contribuyen al estudio de los procesos de transporte de contaminantes y a la observación de fenómenos locales relevantes en procesos de dispersión, como la formación de inversiones térmicas, la generación de regímenes locales de viento (vientos de valle, brisas marinas, etc.).

#### **a) Análisis de trayectorias (modelo HYSPLIT)**

Los métodos lagrangianos, que calculan las trayectorias de parcelas individuales de aire, constituyen un modo útil y natural de estudiar el transporte de sustancias antropogénicas. En el campo de la Meteorología, el adjetivo “lagrangiano” se refiere generalmente a estudios cinemáticos, lo cual implica el conocimiento del campo de velocidad de viento, bien a partir de observaciones, o bien a través de la salida de un modelo meteorológico, como en este caso. Este campo de velocidades de viento se usa para calcular las trayectorias de hipotéticas parcela de aire carentes de masa dentro del correspondiente campo de flujo, trayectorias que se pueden analizar para profundizar en el estudio del transporte atmosférico a diferentes escalas.

Se han calculado una serie de retrotrayectorias de masas de aire para cada uno de los episodios identificados, que describen el recorrido seguido por una masa de aire durante las 72 horas previas a su destino final. Este punto final del recorrido se fija sobre la vertical de la estación de la red de monitorización que alcanza el valor máximo de inmisión de ozono troposférico, coincidiendo con el instante horario en que dicho máximo es alcanzado. El cálculo

se ha realizado mediante un modelo de trayectorias, el modelo NOAA HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), descrito en el apartado 3.5.3 del capítulo 3, desarrollado por Draxler y Hess (Draxler y Hess, 1997; Draxler y Hess, 1998) y de amplio uso en el campo de la contaminación atmosférica de origen fotoquímico (Draxler, 2000; Anastassopoulos et al., 2004; Pont et al., 2003; Carvalho et al., 2010).

El uso conjunto de mapas sinópticos y retrotrayectorias permite examinar la influencia de la circulación atmosférica durante los períodos con altos niveles de ozono registrados en áreas rurales, existiendo ya trabajos de este tipo a nivel peninsular (García et al., 2005). En nuestro estudio, el objetivo de este conjunto de retrotrayectorias se centra en facilitar la caracterización y la procedencia de los flujos atmosféricos, y su relación con los patrones sinópticos, contribuyendo así a identificar y evaluar el potencial contaminante de regiones distantes, que pueden constituir posibles focos de la contaminación fotoquímica en el norte de Galicia. Para ello se ha realizado una clasificación de dichas trayectorias en función de su dirección de procedencia, asociándolas a cada situación sinóptica, y eligiendo posteriormente un episodio representativo de cada posible foco.

#### b) Estudio de simulaciones meteorológicas de mesoscala (modelo MM5)

Para reproducir los procesos meteorológicos que han tenido lugar durante algunos de los episodios de inmisión de ozono seleccionados se han realizado simulaciones meteorológicas de mesoscala- $\beta$  para algunos de los episodios, con varios objetivos diferentes:

- Reproducción y análisis de fenómenos meteorológicos importantes para la acumulación de ozono, como las brisas marinas, que son frecuentes en el área de estudio dada su orografía compleja y proximidad al mar
- Obtención de datos meteorológicos en altura (perfiles verticales de viento y temperatura), que permiten determinar la estructura general de la capa límite atmosférica, con gran influencia en fenómenos de acumulación y dispersión de ozono troposférico
- Obtención de campos meteorológicos necesarios como datos de entrada para el posterior desarrollo de simulaciones de calidad de aire
- Cálculo de retrotrayectorias con una resolución espacial mayor, para poder discriminar la posible contribución de penachos contaminantes procedentes de áreas urbanas próximas

Estas simulaciones se han desarrollado con el modelo PSU/NCAR Mesoscale Model 5, version 3, release 3.2 (Dudhia, 1993; Grell et al., 1995) conocido como modelo MM5, uno de los modelos numéricos de predicción a corto plazo más ampliamente extendidos entre la comunidad internacional para modelización atmosférica.

Para la reproducción de los procesos meteorológicos se seleccionaron dos cuadrículas anidadas (two-way nesting), una de baja resolución (D1), con un dominio de 3000 km x 2400 km y tamaño de cuadrícula de 30 km, y otra de mayor resolución (D2), que cubre un dominio de 430 km x 430 km con tamaño de cuadrícula de 10 km. La cuadrícula más externa cubre la península Ibérica, Francia, el sur de las Islas Británicas y parte del océano Atlántico, mientras la más interna se extiende sobre el cuadrante noroeste de la península Ibérica (figura 2.3).

Se emplearon en resolución vertical 23 niveles- $\sigma$ , disminuyendo el espaciado dentro de la capa límite, de modo que 6 de ellos se encontraban por debajo de los 1000 m sobre el nivel del suelo. El nivel más alto se fijó a un geopotencial de 100 hPa.

Las opciones físicas usadas para las simulaciones en ambos dominios fueron: esquema Medium-Range Forecast MRF (Hong y Pan, 1996) para la parametrización de la capa límite, Fritsch-Chappell (Fritsch y Chappell, 1980) para el esquema de cúmulos, parametrización "simple ice" de Dudhia para la modelización de humedad, "cloud radiation" para modelización de radiación atmosférica y el "modelo de suelo de cinco capas" para la temperatura del suelo.

La topografía de ambos dominios fue interpolada a las cuadrículas del modelo a partir de la base de datos global de latitud-longitud, con 1° y 30" de resolución para las cuadrículas externa e interna, respectivamente. Del mismo modo, el uso de suelos se obtuvo a partir de la base de datos del U.S. Geological Survey (USGS), con 25 categorías, que aparece incluida en el propio modelo MM5.

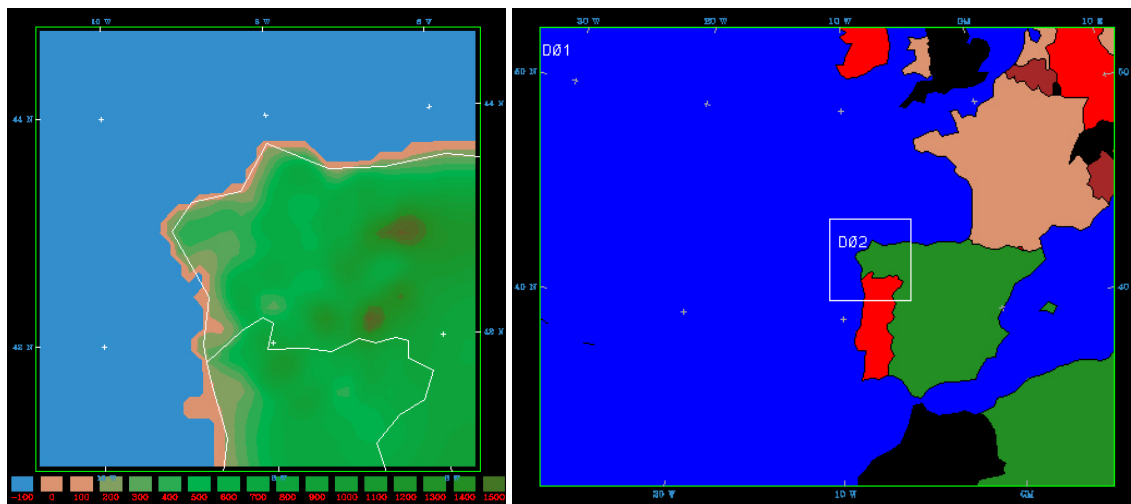


Figura 2.3: “Cuadrículas empleadas en el modelo MM5 para la simulaciones numéricas: relieve topográfico en el dominio más interno (izqda.) y área cubierta por ambos dominios (dcha.)”

La ejecución de las simulaciones requiere unas condiciones iniciales y de contorno, como base para la evolución de los parámetros meteorológicos. Se ha recurrido a los análisis del modelo GFS (antiguo AVN), perteneciente al National Center for Environmental Prediction (NCEP, USA). Estos análisis se han recogido para los tres períodos de simulación estudiados, a intervalos de 6 horas (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC y 18 UTC), con resolución espacial de 1 grado (aproximadamente 100 km en nuestras latitudes), y datos a los niveles de presión estándar.

No se consideró necesario añadir un tiempo de “spin up” previo al comienzo de las simulaciones (8-16 horas), ya que la secuencia más relevante de los episodios son las jornadas centrales, de modo que el día inicial de los mismos puede actuar como período de “spin up” sin pérdida de información apreciable.

Se ejecutaron tres simulaciones, para tres períodos establecidos (episodio nº 1, del 14 al 23 de Julio de 2002, episodio nº 6, del 16-24 de Marzo de 2003 y episodio nº 11, del 9 al 22 de Septiembre de 2003 ). En conjunto, se simularon 33 días entre las tres simulaciones.

### 2.5.2 Simulaciones de calidad del aire

Los modelos de calidad de aire usan técnicas numéricas para simular los procesos físico-químicos que afectan a los contaminantes atmosféricos, a medida que ellos se dispersan y reaccionan en la atmósfera. Incluidos dentro de estos modelos, los modelos fotoquímicos de gran escala se centran en simular los impactos de múltiples fuentes de contaminantes, estimando la concentración y la deposición de contaminantes tanto inertes como reactivos a escala local, regional y global.

Estos modelos de calidad de aire son esenciales para examinar las complejas interacciones existentes entre emisiones, meteorología, orografía y química atmosférica, proporcionando simulaciones integradoras de la información física y química obtenida sobre el sistema de precursores de ozono.

Existen dos tipos de modelos fotoquímicos de calidad de aire: modelos lagrangianos de trayectoria, que emplean un sistema de referencia móvil, y modelos eulerianos, que usan un

sistema de coordenadas fijo. Los modelos eulerianos de calidad de aire se caracterizan por una descripción más completa de los procesos físicos y químicos atmosféricos y por la estimación de la concentración de especies químicas en todo el dominio del modelo, a costa de un mayor coste computacional que los modelos de tipo lagrangiano.

Durante este estudio se han utilizado las simulaciones realizadas por dos sistemas de predicción de calidad de aire a escala europea, los proyectos EURAD (EUROpean Air Pollution Dispersion Model, Memmesheimer et al., 2001) y PREV'AIR (Prev'Air, 2009).

El análisis de las predicciones a corto plazo realizadas por ambos modelos pretende cubrir los siguientes objetivos:

- Determinar el panorama global de la contaminación fotoquímica a escala continental (Europa Occidental)
- Aportar información sobre el posible transporte a larga distancia de ozono y precursores sobre el oeste de Europa
- Solventar los problemas derivados de la carencia de estaciones de monitorización y/o de información disponible en el noroeste peninsular
- Obtener patrones repetidos de generación, transporte o desaparición de ozono troposférico sobre la península Ibérica y particularmente sobre la Comunidad Gallega

#### a) Modelo EURAD

La mencionada necesidad de disponer de información sobre la distribución espacial y evolución temporal de la contaminación fotoquímica y sus precursores sobre el área que rodea a la región de estudio ha conllevado la utilización de las predicciones realizadas por el modelo EURAD (EUROpean Air Pollution Dispersion Model, Memmesheimer et al., 2001), disponibles a través de la web (Rhenish Institute for Environment Research, 2010). Este modelo ha sido aplicado a un gran número de episodios de contaminación atmosférica, dirigidos sobre todo a estudios de contaminación atmosférica de origen fotoquímico.

El modelo EURAD simula los procesos físicos, químicos y dinámicos que controlan la emisión, producción, transporte y deposición de especies traza atmosféricas. Como resultado, EURAD proporciona concentraciones de estas especies en la troposfera sobre Europa y su eliminación de la atmósfera por deposición húmeda y seca. El sistema consiste en tres submodelos para el tratamiento de la meteorología (el ya mencionado PSU/NCAR MM5), la química y el transporte (EURAD-Chemistry Transport Model CTM) y las emisiones (EURAD Emission Model).

El sistema de modelización se basa en el método de dominios anidados, simulando la calidad de aire desde escala local a escala continental, y sus mecanismos químicos son el RADM2 (Regional Acid Deposition Model, version 2) y RACM (Regional Atmospheric Chemistry Mechanism), completados con el mecanismo MADE (Modal Aerosole-Dynamics model para EURAD). El mecanismo RADM2 contiene 63 especies reactivas, tratadas en 158 reacciones químicas.

Se han utilizado para cada episodio predicciones de máximos diarios de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno, con un horizonte temporal de 24 horas y resolución espacial de 125 km. También se han consultado las correspondientes simulaciones meteorológicas de viento y temperatura, para facilitar el análisis de las predicciones de inmisión.

#### b) Modelo Chimere

Además del modelo EURAD, otra fuente de predicciones de calidad de aire empleada en el análisis ha sido el sistema Prev'Air, sistema francés para monitorización y predicción de la calidad del aire, instaurado en 2003 bajo la supervisión del Ministerio de Medio Ambiente de Francia y operado por el Instituto Nacional para el Medio Ambiente y Riesgos Industriales (INERIS).

El sistema Prev'Air es semejante al sistema EURAD en su diseño, aunque el modelo de calidad de aire empleado en el desarrollo de sus predicciones es diferente, ya que los procesos físico-químicos relacionados con la calidad del aire son tratados por el modelo Chimere (Schmidt et al., 2001; Vautard et al., 2001). El modelo Chimere es un modelo euleriano de calidad de aire basado en el mecanismo químico MELCHIOR, que incluye más de 300 reacciones químicas involucrando a un total de 80 especies gaseosas.

Para cada período se han empleado predicciones de concentraciones diarias máximas y medias de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno, con un horizonte temporal de 24 horas y resolución espacial de 50 km.

## **2.6 Establecimiento de hipótesis**

El objetivo final del estudio consiste en la determinación de las causas que originan las situaciones de elevadas concentraciones de inmisión de ozono en el noroeste de Galicia. Por tanto, una vez reunidos y analizados los datos referidos en los anteriores epígrafes de este capítulo, se elaboró una serie de hipótesis que permiten explicar total o parcialmente los altos niveles de ozono en cada uno de los episodios seleccionados, con especial atención al posible origen de los mismos (generación local o transporte alóctono), intentando precisar los principales focos geográficos (Europa Central, Islas Británicas, península Ibérica, etc.) que afectan a dichas concentraciones.

La elaboración de dichas hipótesis ha requerido varios análisis previos, como ya se ha comentado, destacando los realizados sobre:

- a) Relación de la climatología sinóptica y los altos niveles de ozono
- b) Transporte de ozono en relación con los flujos atmosféricos sobre el noroeste peninsular
- c) Procesos meteorológicos a escala local relacionados con el aumento de los niveles de ozono
- d) Identificación del origen de las masas de aire enriquecido en ozono

Como resultado, se ha elaborado una clasificación de los episodios de ozono ocurridos en el noroeste de Galicia durante los años 2002-2007, atendiendo a los factores meteorológicos responsables y a su origen. Esta clasificación podría tener valor predictivo en un futuro, si se continúa ampliando con datos recopilados sobre nuevos episodios de ozono, pudiendo sentar las bases para un sistema de predicción de la contaminación fotoquímica en Galicia.





### RESULTADOS

---

Este capítulo comprende la descripción y discusión de los resultados obtenidos tras la aplicación del método de análisis a los episodios seleccionados, según se explicó en el capítulo anterior. La discusión de los resultados está orientada al establecimiento y validación -cuando sea posible-, de hipótesis que expliquen las causas que originan los altos niveles de ozono troposférico registrados en los períodos estudiados.

El capítulo parte de la descripción del área de trabajo, indicando los datos recogidos en las estaciones de la zona (meteorológicos y de calidad del aire), necesarios para llevar a cabo el análisis de los episodios, e incluye una caracterización de las estaciones de medida utilizadas.

A continuación se evalúa la situación general de los niveles de ozono troposférico en la Comunidad Autónoma Gallega, centrada en la evolución de dichos registros en el período 2002-2007, y con especial atención a la época primaveral-estival, en la que la incidencia del ozono superficial es máxima.

El capítulo prosigue con el análisis propiamente dicho de los episodios, comenzando con un análisis de la meteorología sinóptica, que comprende la caracterización de los patrones sinópticos bajo los cuales se desarrollan, y el establecimiento de una clasificación de las trayectorias seguidas por las masas de aire durante su transcurso. Posteriormente se describen los episodios identificados, caracterizándolos a partir de la evolución de sus registros de inmisión de ozono, y teniendo en cuenta propiedades como el carácter puntual o progresivo del episodio, la persistencia de las concentraciones o la presencia de máximos de concentración nocturna de ozono.

Para finalizar, se han tratado de determinar las causas principales para cada episodio, a partir del estudio conjunto de todos los análisis parciales mencionados previamente (meteorología sinóptica y local, análisis de trayectorias y caracterización de medidas de inmisión), desembocando en el establecimiento de una clasificación de episodios según el origen principal de las concentraciones de ozono registradas, que pueden ser de carácter local o alóctono. Una vez determinada la clasificación por origen, se ha elegido un episodio representativo de cada tipo, y se ha descrito en mayor profundidad, de modo que pueda servir de referencia para otros posibles episodios de las mismas características.

#### **3.1 Descripción de la zona de estudio.**

En este apartado se presentan las características orográficas, topográficas y climatológicas del área de estudio, aspectos fundamentales para analizar y comprender los niveles de concentración de ozono troposférico registrados en la zona. El primer epígrafe presenta una descripción general de Galicia, referente a su orografía y climatología, basada en Martínez Cortizas (Martínez Cortizas y Pérez Alberti, 1999) y Precado Ledo (Precado y Sancho, 2001). A continuación se describen los rasgos orográficos principales del norte de las provincias de A Coruña y Lugo, centrados en la comarca del Eume y áreas limítrofes, donde se sitúan las estaciones seleccionadas para la identificación de episodios con altos niveles de ozono, así como la climatología de la región, basada también en las obras anteriores.

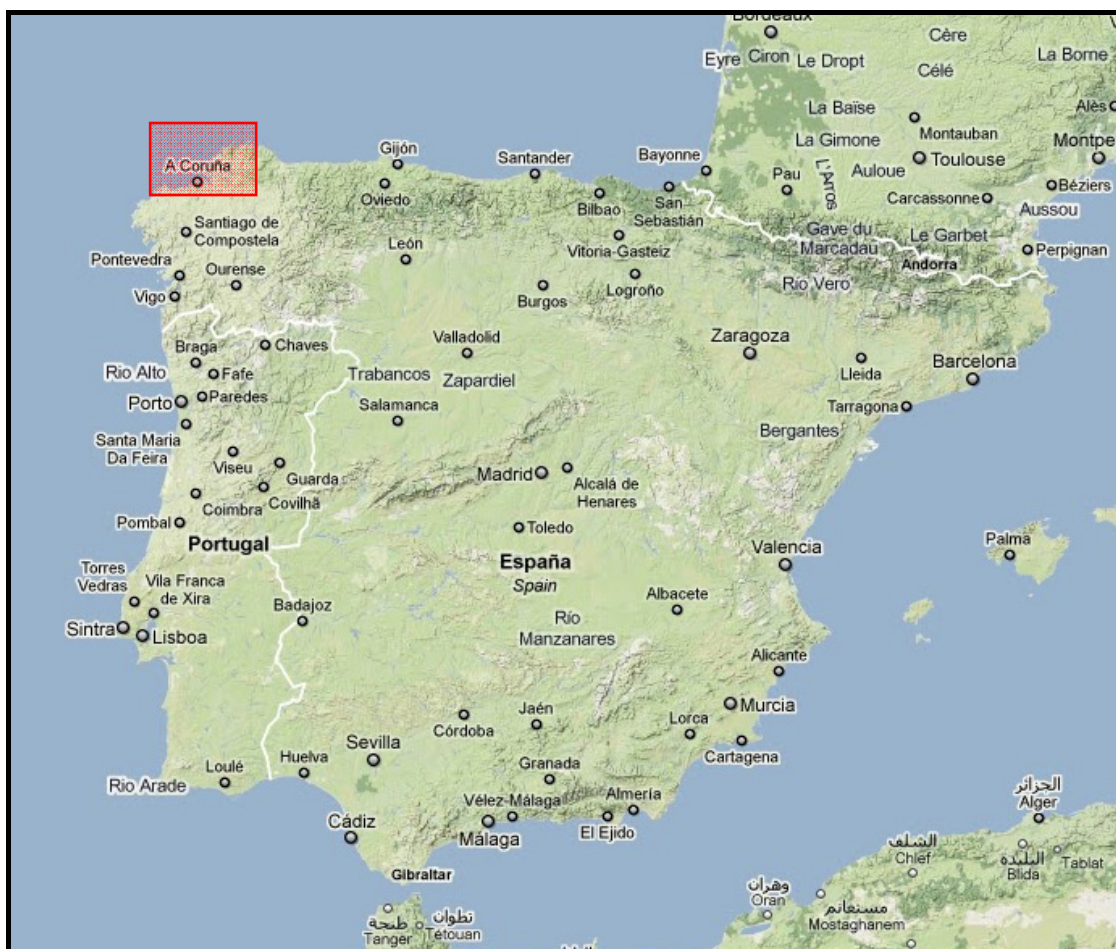


Figura 3.1: “Orografía de la península Ibérica y situación del área de estudio en el noroeste peninsular (recuadro rojo), dentro de la Comunidad Autónoma de Galicia”

### 3.1.1 Orografía y climatología de Galicia

#### Climatología

Galicia está localizada geográficamente entre los 42° y 44° de latitud norte, en una posición excéntrica del continente europeo. Esta localización establece el balance radiativo final y determina los rasgos zonales de la circulación atmosférica, y sitúa a la Comunidad en una posición hemisférica de transición entre las zonas excedentarias y las deficitarias energéticamente, como punto de encuentro entre diversas masas de aire que buscan el reequilibrio energético de la atmósfera e imprimen gran variedad a la sucesión de tipos de tiempo. De este modo, el espacio sinóptico gallego se ve afectado por un intenso tráfico de masas de aire de diversa naturaleza, que a su paso por estas latitudes, dejan constancia de los rasgos térmicos e higrométricos de la región fuente de la que proceden, al igual que la circulación oceánica regula, a través de la deriva de la corriente cálida del Golfo, la temperatura final alcanzada en las costas.

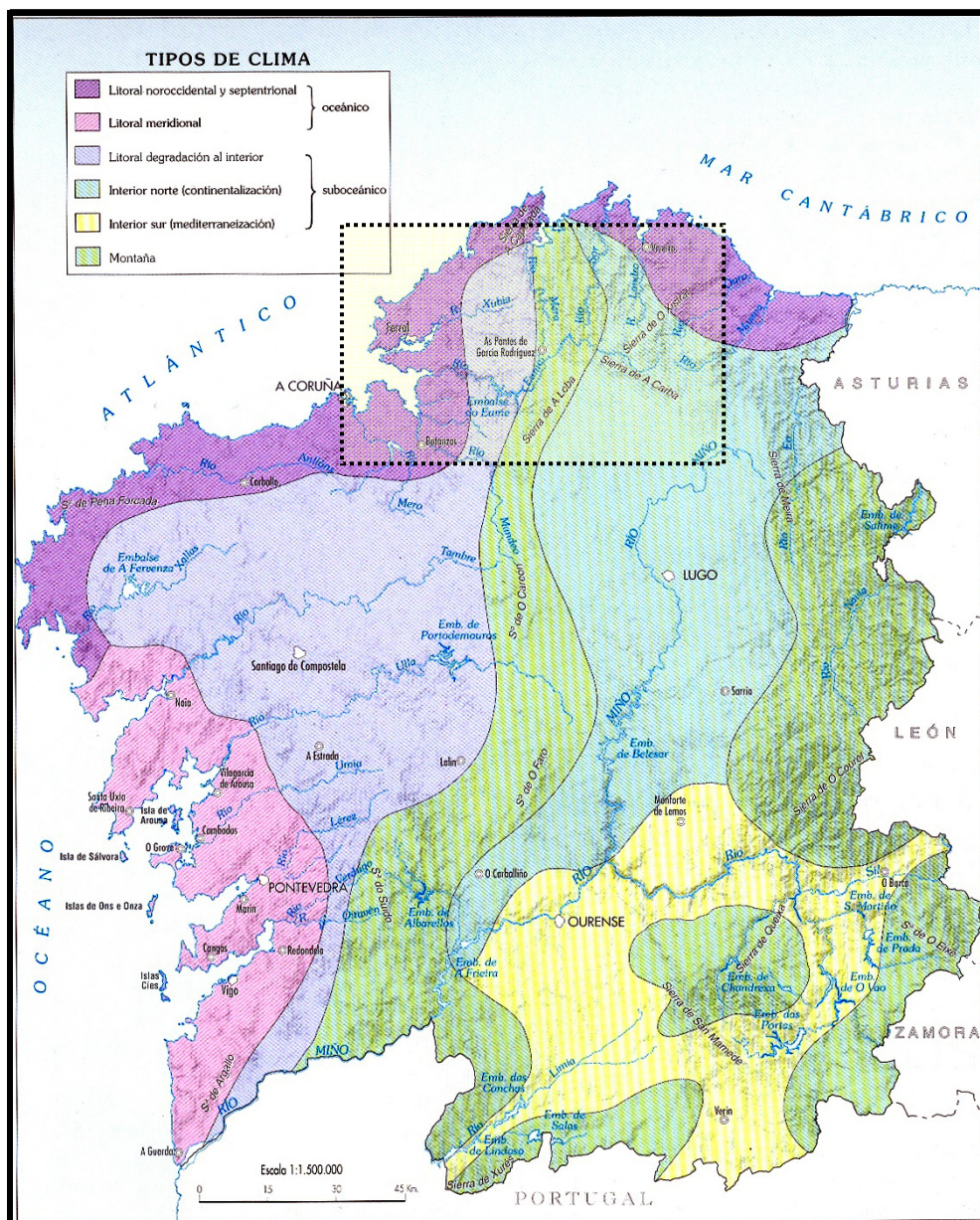


Figura 3.2: “Tipos climáticos existentes en Galicia. El recuadro con borde discontinuo recoge aproximadamente la posición y extensión del área de estudio. Adaptado de Precado y Sancho (2001)”

Esta importante influencia procedente de dominios distantes hacen indispensable situar la región gallega en un marco amplio, que se extendería desde el litoral atlántico del continente americano y la Rusia europea, y por otro, entre el trópico y la cuenca polar. Los aspectos más significativos de la circulación atmosférica en esta región del globo son el vórtice circumpolar, con sus oscilaciones cíclicas y sus desplazamientos latitudinales, con la corriente en chorro asociada, que determina los regímenes circulatorios sobre el noroeste peninsular, descritos en el apartado 3.5.2, de “Análisis sinóptico”.

A nivel peninsular, Galicia también es una franja de transición bioclimática desde el amplio perímetro costero hasta las sierras orientales y sudoorientales que conectan con la Meseta. La complejidad morfológica del territorio facilita su compartimentación, creando ambientes singulares a meso y microescala. Por tanto, situación y morfología son dos factores claves para analizar la singularidad y variedad del clima gallego: en Galicia la expresión climática tiene un fuerte control geográfico que se aprecia, por ejemplo, en el papel intensificador del sustrato orográfico sobre la precipitación (Martínez Cortizas y Pérez Alberti, 1999).



La articulación de los elementos termopluviométricos derivada de la organización regional de la circulación de la atmósfera y su interacción con las variables geográficas de superficie, sometida a un análisis multivariado, permite avanzar una clasificación de los tipos de clima en Galicia. Se obtiene como resultado la existencia de tres factores responsables de la variabilidad climática: el primero aglutina los parámetros relacionados con la precipitación y la oscilación térmica, el segundo está formado por los valores térmicos y el tercero está constituido esencialmente por el valor de las temperaturas mínimas. Es a partir del primero de los factores del que nace esencialmente la distinción de los grupos de clima.

Un análisis clasificatorio de los observatorios mediante las técnicas de agrupamiento revela la división del territorio en tres grandes espacios (Precado y Sancho, 2001), caracterizados respectivamente por un clima muy húmedo (Rías Baixas, Dorsal meridiana y montañas interiores), húmedo (Golfo Ártabro, Rías Altas) y subhúmedo (planicies y valles interiores). A partir de estos tres grandes tipos, se diferencian en base a las propiedades térmicas: cálidos (Rías Baixas, valles del SE y SO), moderadamente cálidos y frescos (Golfo Ártabro, Rías Altas, Dorsal), fríos (planicies interiores, valles del N y S) y muy fríos (sierras interiores), según se muestra en la figura 3.2.

### *Orografía*

El relieve gallego se caracteriza por dos rasgos principales: la graduación de formas desde la costa hacia el interior y la existencia de una clara dicotomía horizontalidad-verticalidad en todo su territorio.

La orografía gallega es un auténtico mosaico de “teclas” hundidas y levantadas (figura 3.3), que se suceden entre la costa y los límites con Asturias, León, Zamora y Portugal, destacando los siguientes componentes:

- a) La costa y los niveles aplanados que la bordean, con alturas entre los 30 m y los 600 m, sitúandose estos niveles más elevados sobre sierras litorales, como las sierras de A Capelada, entre las rías de Cedeira y Ortigueira, Barbanza, entre las rías de Muros-Noia y Arousa, o los montes da Groba y la Serra do Argallo, en el SO de Galicia, entre el mar y la depresión tectónica de Porriño-Tui.
- b) Llanuras elevadas hacia el interior, que se sitúan entre los 300 y los 1100 m; en este caso se localizan sobre los sectores culminantes de las sierras occidentales que, a modo de dorsal, se extienden desde la sierra da Faladoira, al norte, hasta la sierra de Faro de Avión y los montes da Paradanta, al sur. Entre estas sierras y las litorales destaca un conjunto de depresiones tectónicas meridianas, como las de Val do Dubra, Padrón, Caldas de Reis o Porriño-Tui.
- c) Desde las sierras occidentales hasta las orientales, el relieve se descompone en otro amplio abanico de bloques hundidos y elevados: por el norte, cerca del mar se levantan las sierras septentrionales, que alcanzan, en el macizo do Xistral, los 1000 m; por el sur encontramos las sierras meridionales, que alcanzan los 1500 m en el Xurés y las sudorientales, con 2000 m en Pena Trevinca, mientras que por el este se encadenan las orientales, que se aproximan a los 2000 m en la Serra de Ancares.
- d) El sector central de Galicia se caracteriza por un amplio conjunto de superficies aplanadas y de depresiones tectónicas como las de A Terra Chá (en la cabecera del río Miño), Sarria, Lemos, Maceda, A Limia o Monterrei, entre los 400 y los 600 m de altitud. Existen numerosos valles fluviales que se incrustan en las sierras citadas, sirviendo de nexo de unión entre éstas, las llanuras o “chairas” y las depresiones tectónicas, de modo que suelen presentar encajamientos profundos hasta las proximidades de su desembocadura.



Figura 3.3: “Grandes unidades del relieve gallego. Las manifestaciones climáticas en Galicia tienen un fuerte control orográfico gracias a la compleja articulación de las unidades del relieve. Adaptado de Martínez Cortizas y Pérez Alberti (1999)”

#### *Influencia de la orografía en el clima de Galicia*

Además de la graduación citada, la distribución de formas es otro factor del relieve que desempeña un importante papel en el clima de Galicia: la mayor parte del perímetro gallego está ocupado por sierras, que en ocasiones se asientan formando cinturones, como ocurre en el litoral noroccidental, con una primera línea de sierras litorales, como A Capelada, y un segundo cinturón más al Este, formado por las sierras occidentales, como A Faladoira. Esta característica origina un litoral abierto con contrastes altitudinales y un interior cerrado salvo en algunos sectores, como el flanco occidental.

En el interior, la orientación de las formas también es un importante factor para comprender el clima de Galicia: a nivel general, una gran parte de las sierras presentan un orientación norte-sur, sobre todo las sierras occidentales y orientales, lo que dificulta el paso de las masas de aire de componente oeste. Otras sierras, como las septentrionales, se extienden de oeste a este, dificultando el paso de las masas de aire de componente NW, N y NE.

La influencia del relieve en el clima, a consecuencia de sus interacciones con la atmósfera, se pone de manifiesto en múltiples aspectos, de los cuales se reflejan a continuación los más relevantes a efectos de la posible distribución de ozono troposférico:

#### a) Condiciones morfológicas de la costa

El perímetro litoral ejerce un efecto aerodinámico sobre las masas de aire, de modo que la ralentización del flujo sobre la línea de costa provoca un fenómeno de concentración y elevación del aire. Este efecto durante el verano se suma al efecto térmico ascendente derivado del fuerte calentamiento superficial y a la propia turbulencia, de modo que esta acción combinada permite el desarrollo de nubes tipo cúmulo o cumulonimbo, y favorece el mecanismo de las brisas marinas.

De la misma forma, el efecto aerodinámico de “obstáculo” actúa sobre flujos paralelos u oblicuos al litoral: por ejemplo, en verano los vientos de componente norte a lo largo de las costas del sur de Galicia refuerzan la subsidencia ya impuesta por las condiciones dinámicas reinantes bajo el anticiclón de las Azores.

#### b) Relieve costero

Este efecto de obstáculo que causa el límite continental sobre los flujos oceánicos está enmascarado por la acción del accidentado relieve costero. La complejidad del perfil litoral es muy elevada en las Rías Baixas, así como en el Arco Ártabro y en la Mariña lucense, zonas estas dos últimas que limitan el área en la que se desarrolla este estudio.

La principal influencia se encuentra en la gradación de lluvia, al producirse áreas de sombra a sotavento del relieve que se interpone, e incluso al desarrollo de cierto efecto Föhn a sotavento de las sierras septentrionales bajo flujos de componente S-SO.

Sin embargo, en relación con el ozono, el principal interés reside en la circulación atmosférica litoral y el sistema de brisas: la oscilación diurna de las brisas es el hecho más importante de la circulación litoral en las regiones oceánicas templadas durante el verano, siendo características las costas atlánticas de la península Ibérica por la formación de importantes brisas litorales, capaces de enmascarar los regímenes de vientos asociados a la situación sinóptica general.

Los cielos despejados y la insolación fuerte durante la mañana, junto con los descensos térmicos y la falta de nubosidad durante la noche facilitan el sistema de brisas, ligadas a la extensión de los tipos anticiclónicos oceánicos sobre Europa Occidental, que dirigen vientos del sector NE-E sobre el noroeste peninsular. Por ejemplo, Betanzos, localizado en una zona próxima al área de estudio considerada, puede alcanzar 20°C de máxima en un día de verano, mientras Monfero, unos cinco kilómetros hacia el interior en línea recta, registrará unos 32 °C. Este gradiente intenso, unos 12°C, provoca brisas extremadamente intensas en este ámbito, que alcanzan en ocasiones más de 5 m/s en esa zona. Estas brisas marinas permiten al aire fresco y húmedo penetrar en el interior, donde contribuye a disminuir los contrastes térmicos y tiende a aumentar rápidamente la nubosidad (nubes cumuliformes provocadas por la pequeña discontinuidad entre el aire marino fresco y el aire cálido interior). Los valles de las Rías, profundos y perpendiculares a la línea de costa, canalizan y refuerzan la aparición de nubosidad del tipo descrito.

#### c) Componente orográfica de la precipitación

A pesar de no tener una relación directa con los niveles de ozono, los “óptimos de lluvia” y las “sombras pluviométricas” provocados por los conjuntos montañosos deben citarse, por tener una gran relevancia en Galicia, debido a la existencia de sierras costeras y al alto contenido hídrico de las masas de aire que se acercan al noroeste peninsular desde el Atlántico, con vientos de componente Oeste (figura 3.4).

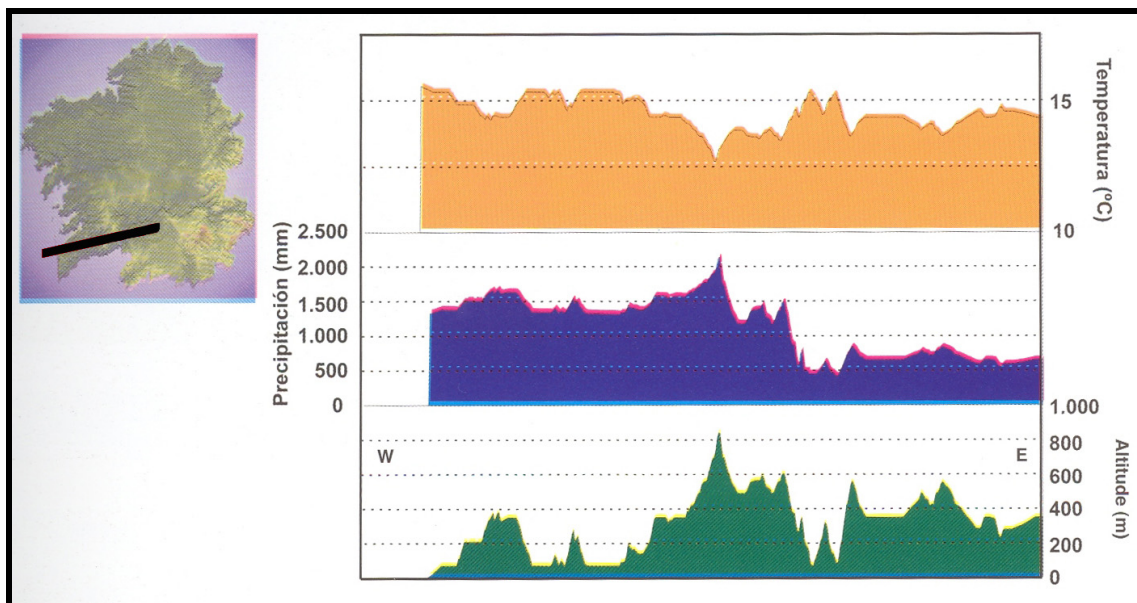


Figura 3.4: “Temperatura anual media y precipitación anual acumulada a lo largo de un transecto desde Baiona hasta la depresión de Ourense. Se aprecia como las vertientes de barlovento de la Dorsal Gallega propician áreas de óptimo pluviométrico, frente al apreciable descenso en las de sotavento. Adaptado de Martínez Cortizas y Pérez Alberti (1999)”

#### d) Sierras

Las sierras principales de Galicia se pueden agrupar en varios conjuntos:

- Sierras centro-occidentales: la Dorsal Gallega, conjunto de sierras que se extiende de norte a sur, desde la Serra da Faladoira, que apenas supera los 700 m de altitud, hasta la Sierra de Faro de Avión, con más de 1100 m. Esta dorsal actúa como una barrera permeable entre las llanuras interiores (Terra Chá, depresión de Lemos, A Limia, etc.) y las tierras de la fachada litoral atlántica.
- Sierras septentrionales: este conjunto de montañas delimitan la Mariña lucense, el sector costero nororiental de Galicia, que se extiende desde los alrededores de Villalba hasta la Terra Chá, al sur de la provincia de Lugo. Su influencia se deja sentir como intensificadoras de la precipitación en las laderas de barlovento de componente norte-nordeste y como pantalla protectora a sotavento de los flujos de componente sur-suroeste.
- Sierras orientales y surorientales: el sector oriental gallego se caracteriza por una serie de alineaciones montañosas que llegan a superar localmente los 1500-1800 m de altitud, sin existir una dirección predominante, aunque sus estribaciones constituyen un nexo con el resto de la Cordillera Cantábrica. Destaca el clima ligeramente continentalizado, con precipitaciones irregulares, derivadas de fenómenos tormentosos, especialmente en el verano, y en forma de nieve en invierno. Las nieblas de valle y las inversiones térmicas son fenómenos muy frecuentes en estos sistemas.

#### e) Valles y fosas tectónicas

- Valles costeros: son formas topográficamente deprimidas y de desarrollo lineal en el ámbito costero, cuyo principal papel es complementar la transmisión de las características oceánicas, realizada por las rías en primer lugar, de modo que los sistemas nubosos vinculados a los frentes que acompañan a las perturbaciones oceánicas continúan su camino hacia las primeras estribaciones de las montañas de la Dorsal
- Valles del interior: el paradigma es el valle del Miño - Sil, con contrastes marcados a lo largo de su recorrido, desde zonas de valle típicamente fluvial a zonas encajadas debido a

la dinámica diferencial del juego de bloques. El papel de los valles interiores es diferente al de los valles costeros, con gran importancia climática a meso y microescala: se convierten en áreas donde la radiación y las condiciones térmicas difieren de una vertiente a la otra y, sobre todo, respecto de su entorno próximo. Este particular comportamiento térmico, junto con la oferta hídrica de canales, propicia fenómenos como las brisas de valle, las inversiones térmicas y las consiguientes nieblas de estancamiento (típicas en el interior de Galicia, sobre todo cuando las condiciones atmosféricas propician la estabilidad y las intensas pérdidas por radiación en las largas noches de otoño e invierno).

- Fosas tectónicas: son un elemento clave del relieve gallego y se localizan tanto en la costa como en el interior. Cerca de la costa encontramos un rosario de pequeñas depresiones que se extienden de norte a sur, entre las proximidades de Carballo hasta Tui (Padrón, Caldas, Tui-Budiño, ...), siendo fosas estrechas, de pequeña extensión y flanqueadas por laderas empinadas. También cerca del litoral se encuentran las depresiones de As Pontes y Meirama, con dirección predominante oeste-este, también de tamaño pequeño y menor grado de cierre. En el interior de Galicia es donde las fosas tectónicas alcanzan un mayor desarrollo: de norte a sur encontramos la fosa de A Terra Chá, la fosa de Lemos, más hundida, la de Quiroga, la fosa de Maceda, la de Valdeorras, la de A Limia y la de Monterrei. Son territorios hundidos que aparecen flanqueados en mayor o menor medida por murallones y el engarce entre ellas, las llanuras y las sierras se hace por medio de un amplio abanico de valles fluviales que entran y salen de ellas encajonados. En las fosas costeras no existen grandes diferencias climáticas con el territorio que las rodea, mientras en las interiores destacan las condiciones climáticas más marcadas frente al marco climático general del sector en el que se inscriben: mayor continentalidad, plasmada en una mayor amplitud térmica, frecuentes nieblas derivadas de las fuertes pérdidas por radiación nocturna y volúmenes de precipitación sensiblemente inferiores a los recogidos en su entorno, debido a la protección de su perímetro elevado.

### *3.1.2 Orografía y climatología del tercio norte gallego: área de As Pontes*

#### *Orografía*

El territorio analizado se sitúa en el tercio norte de Galicia, y se extiende por el norte de la provincia de A Coruña y el noroeste de la provincia de Lugo. La zona de estudio se centra en la villa de As Pontes, y comprende la citada depresión de As Pontes y sus contornos, de modo que se pueden considerar como límites geográficos aproximados los siguientes: al norte limita con el océano Atlántico, y las rías de Ortigueira, Cedeira y Viveiro; al oeste, con las rías de Ares, Ferrol y Betanzos; al este, con las estribaciones de la Serra do Xistral y la parte oeste de A Terra Chá, mientras que el límite sur se sitúa en la latitud de Betanzos, ligeramente por debajo de la localidad lucense de Vilalba.

El área de estudio considerada se caracteriza por un relieve muy accidentado, con importantes contrastes (figura 3.5): el núcleo central estaría formado por la depresión de As Pontes, en dirección oeste-este, por la que se extiende el valle del río Eume, desde su nacimiento en la provincia de Lugo, en la vertiente oeste de la sierra de O Xistral, hasta su desembocadura formando la ría de Pontedeume. Hacia la mitad de su recorrido, el río Eume se abre paso entre dos conjuntos montañosos, la sierra da Faladoira, al norte, y el cordal de Montouto y la sierra da Loba, al sur, que se prolongan en dirección norte-sur formando parte de la Dorsal Gallega, con altitudes no superiores a los 750-850 metros. Esta depresión o llanura interior de pequeño tamaño se encuentra rodeada por el relieve suave de la costa atlántica al oeste y por la costa cantábrica al norte, de relieve más abrupto (sierra da Capelada), mientras que al noreste se sitúan las sierras septentrionales, destacando la sierra del Xistral. Hacia el sur el relieve se hace más suave y uniforme, en forma de llanuras elevadas en la altiplanicie lucense (A Terra Chá), con alturas entre 400 y 600 metros, y las tierras bajas de la comarca de Betanzos, formadas por los valles del río Mandeo y el Mendo, con altitudes inferiores a los 200 metros. Por tanto, se trata de un terreno complejo, donde las sierras graníticas alternan con depresiones y valles fluviales.



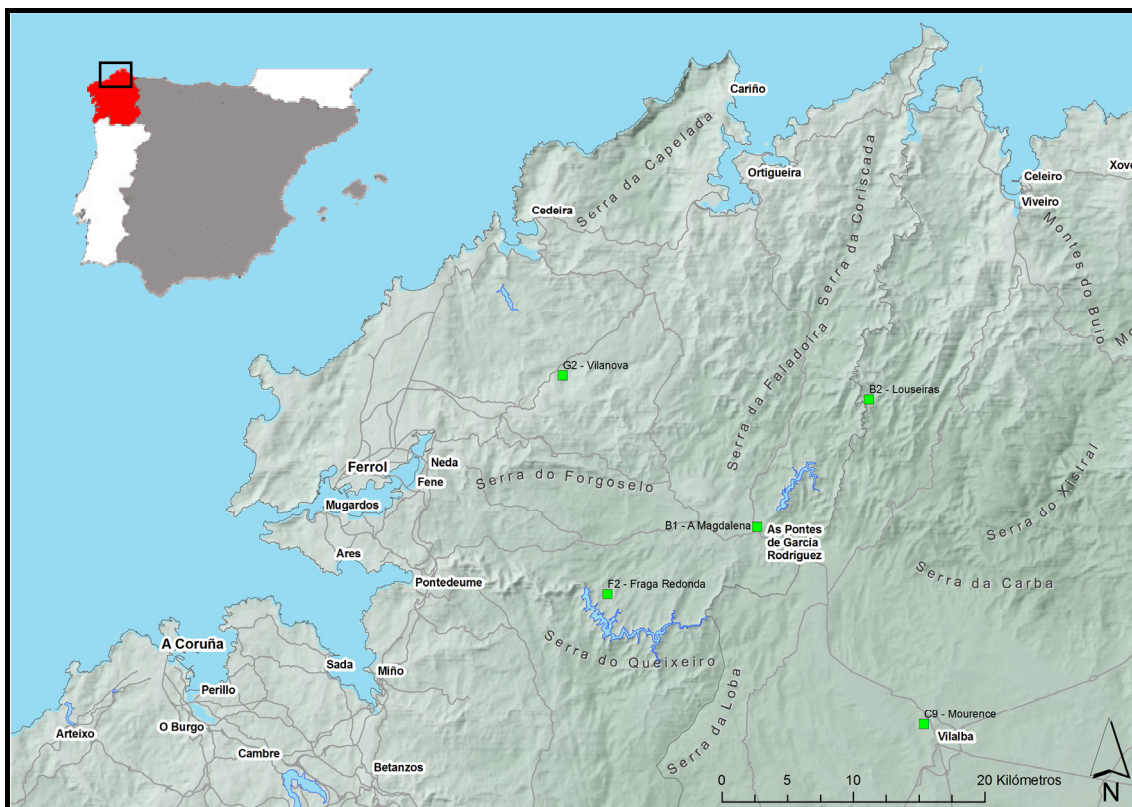


Figura 3.5: “Situación geográfica y orografía del área de estudio, situada en el norte de Galicia. Sus límites aproximados serían al norte las rías de Cedeira, Ortigueira y Viveiro, que desembocan en el océano Atlántico; al sur, el comienzo de la Terra Chá, más abajo de la latitud de Vilalba; al oeste, las rías de Ares, Ferrol, y Betanzos, y al este, con las estribaciones de la Serra do Xistral y la parte oeste de la Terra Chá. Destaca el valle de As Pontes en el centro y el relieve montañoso al norte y nordeste, con elevaciones que apenas superan los 1000 m, mientras que al sur la orografía es muy suave, sin apenas elevaciones, pero de altitud superior a los 500 m”

La delimitación de este área obedece a la situación de las estaciones empleadas para la identificación de los episodios con altos niveles de ozono troposférico, y se ha realizado de forma aproximada, teniendo en cuenta las unidades morfológicas del relieve presentes en la zona que pueden modificar las características meteorológicas medidas en el área; de este modo no se ha extendido el área considerada hacia A Mariña lucense, pues la Serra do Xistral ejerce de barrera para los vientos de componente E-NE característicos de estos episodios, ni hasta el litoral norte de A Coruña, donde la sierra de A Capelada altera las medidas meteorológicas relativamente homogéneas de las cinco estaciones consideradas.

### Climatología

La climatología del área de estudio (figura 3.2) es muy variada, ya que debido a su complejidad orográfica confluyen en la zona varios tipos climáticos, aunque biogeográficamente pertenezca a la región eurosiberiana de clima atlántico, como la mayor parte de Galicia. De oeste a este, podrían citarse los siguientes tipos de clima (Precedo y Sancho, 2001):

1. Clima oceánico característico del litoral noroccidental y septentrional, propio del Golfo Ártabro y la costa norte del área, dentro del cual se situaría la estación G2-Vilanova
2. Clima suboceánico litoral con influencia del interior, en una estrecha franja que se extiende desde la ría de Ortigueira hasta el río Mandeo, limitada al oeste por las Rías Altas y al este por las sierras de la Dorsal Gallega, y que incluiría la estación F2-Fraga Redonda

3. Clima de montaña, en las sierras de la Dorsal Gallega, como la Serra da Faladoira y la Serra da Loba, que sería característico de una pequeña banda situada al este de la villa de As Pontes, en el que se incluiría la estación B2-Louseiras y la estación B1-A Magdalena (aunque ésta se situaría en la frontera entre este tipo climático y el anterior)
4. Clima suboceánico con cierto grado de continentalización, desde el valle del río Sor hacia oriente, ocupando toda la Terra Chá lucense y la Serra do Xistral, bajo el cual se localizaría la estación C9-Mourence

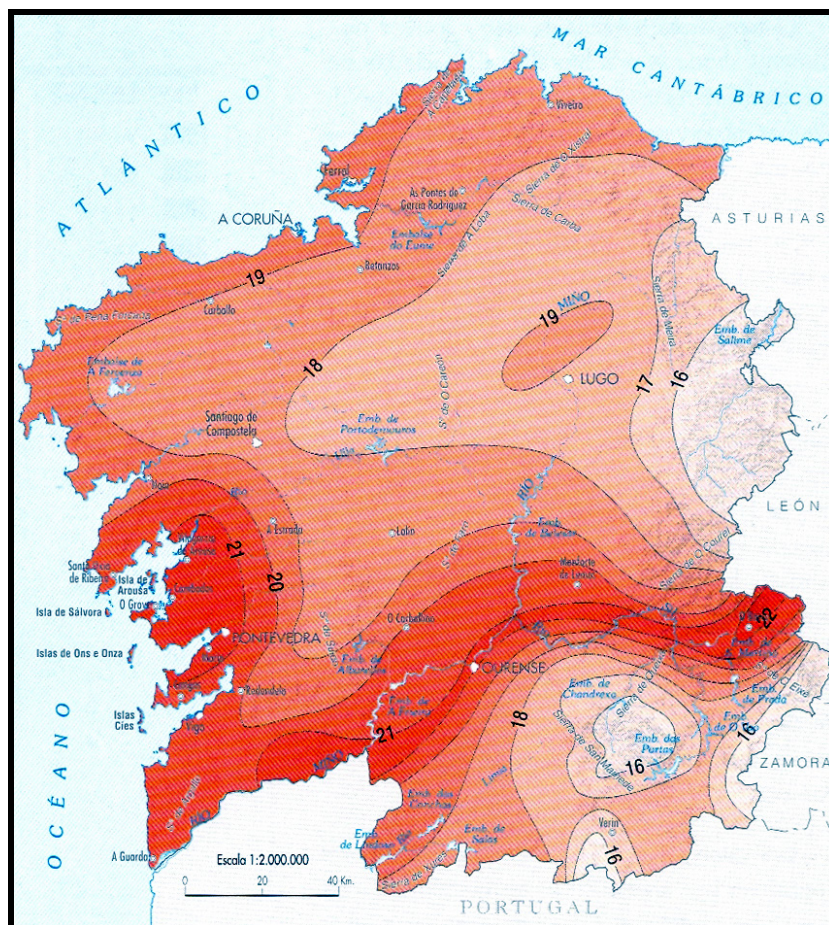


Figura 3.6: "Isotermas de Agosto para Galicia (°C), obtenidas a partir de los datos de los Centros Meteorológicos Territoriales del Instituto Nacional de Meteorología en Galicia durante el período 1961-1990. Adaptado de Precado y Sancho (2001)"

A causa de esta gran variabilidad climática, resulta más sencillo para caracterizar el clima de la zona recurrir a los valores típicos de algunos parámetros climáticos clásicos, con influencia directa en la evolución de los niveles de ozono troposférico, como la temperatura, la precipitación y la insolación, que se describen brevemente a continuación.

Las temperaturas de verano en el norte de la provincia de A Coruña se caracterizan por presentar unas isotermas de temperatura media de Agosto entre 17 °C y 19 °C, en un gradiente descendente desde la costa occidental hacia el interior. Son valores de temperatura media inferiores a los del sur de Galicia, con isotermas entre 20 °C y 21 °C, y sólo superan a las zonas montañosas del este y sureste gallego (figura 3.6).

El flujo de insolación incidente se encuentra en algunos puntos de Galicia entre los valores más bajos de la península Ibérica (< 2000 horas), y en concreto los menores niveles de Galicia se alcanzan en nuestra región de estudio, con una insolación anual entre 1600-1800 horas (sólo



superiores a la Mariña lucense, con menos de 1600 horas anuales), frente a las más de 2200 en el litoral sur de Pontevedra (figura 3.7). Como cabe esperar, el régimen anual concentra el mayor número de horas de sol en verano, siendo la primavera más soleada que el otoño.

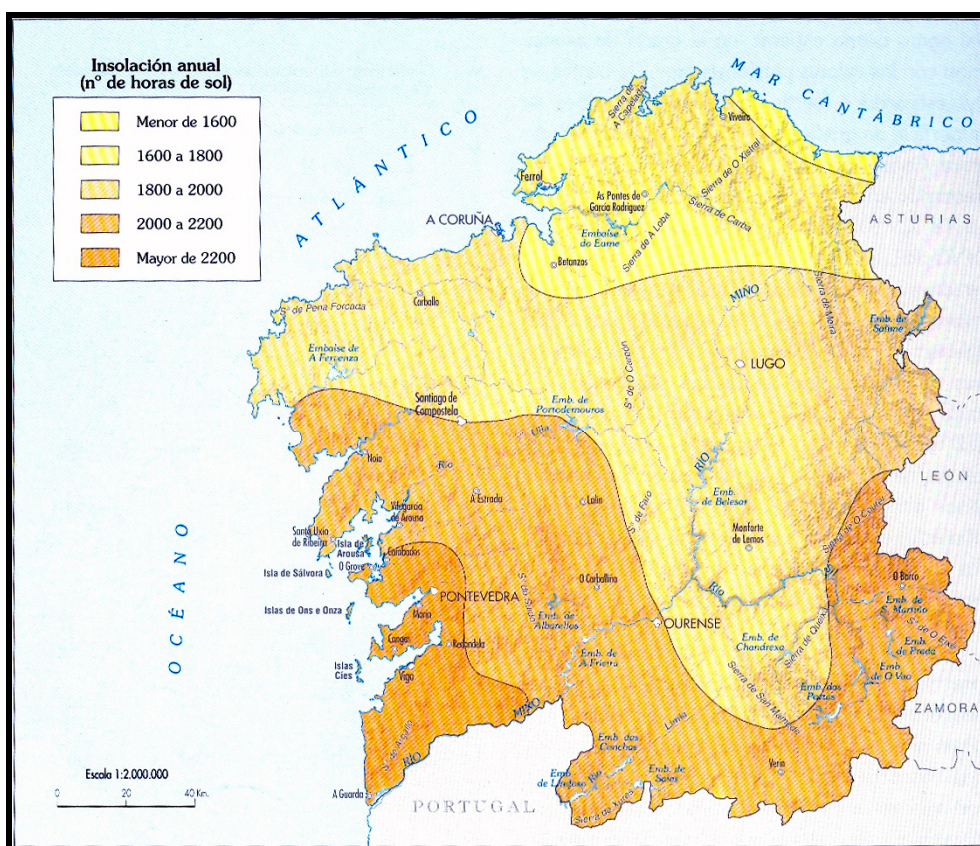


Figura 3.7: “Insolación anual en Galicia (nº de horas de sol), obtenida a partir de los datos de los Centros Meteorológicos Territoriales del Instituto Nacional de Meteorología en Galicia durante el período 1975 - 1990. Adaptado de Precedo y Sancho (2001)”

La pluviometría en el entorno de As Pontes se sitúa entre los 1600-1800 mm anuales, con disminución progresiva hacia occidente y oriente (1000 a 1200 mm en el golfo Ártabro y en las estribaciones orientales de la Serra do Xistral). Las isoyetas de verano oscilan entre 100 y 160 mm de lluvia en la zona, entre los valores más elevados del noroeste peninsular (figuras 3.8 y 3.9). Estos datos citados proceden del Centro Meteorológico de Galicia, perteneciente al antiguo Instituto Meteorológico Nacional, a partir de registros de los años 1961-1990, y de la Confederación Hidrográfica del Norte, siendo recogidos en Precedo y Sancho (2001).

El análisis de estas variables climáticas indica que la zona norte de A Coruña y Lugo debería ser una de las áreas gallegas con menor potencial anual de generación autóctona de ozono, dado el bajo nivel de insolación y la relativamente alta precipitación estival. Esto sugiere un mayor potencial climático para la existencia de mayores niveles de ozono troposférico en áreas como las Rías Baixas o el interior de Pontevedra, y apoya la necesidad de establecer un mayor número de estaciones de calidad de aire con medida de ozono en el sur de Galicia.

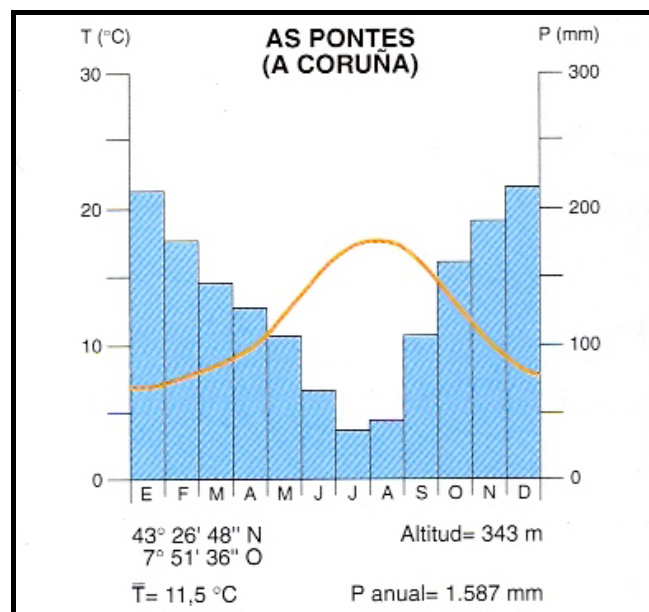


Figura 3.8: “Gráfico termopluviométrico para la villa de As Pontes, según datos del Instituto Nacional de Meteorología en Galicia durante el período 1961 -1990. Adaptado de Precedo y Sancho (2001)”

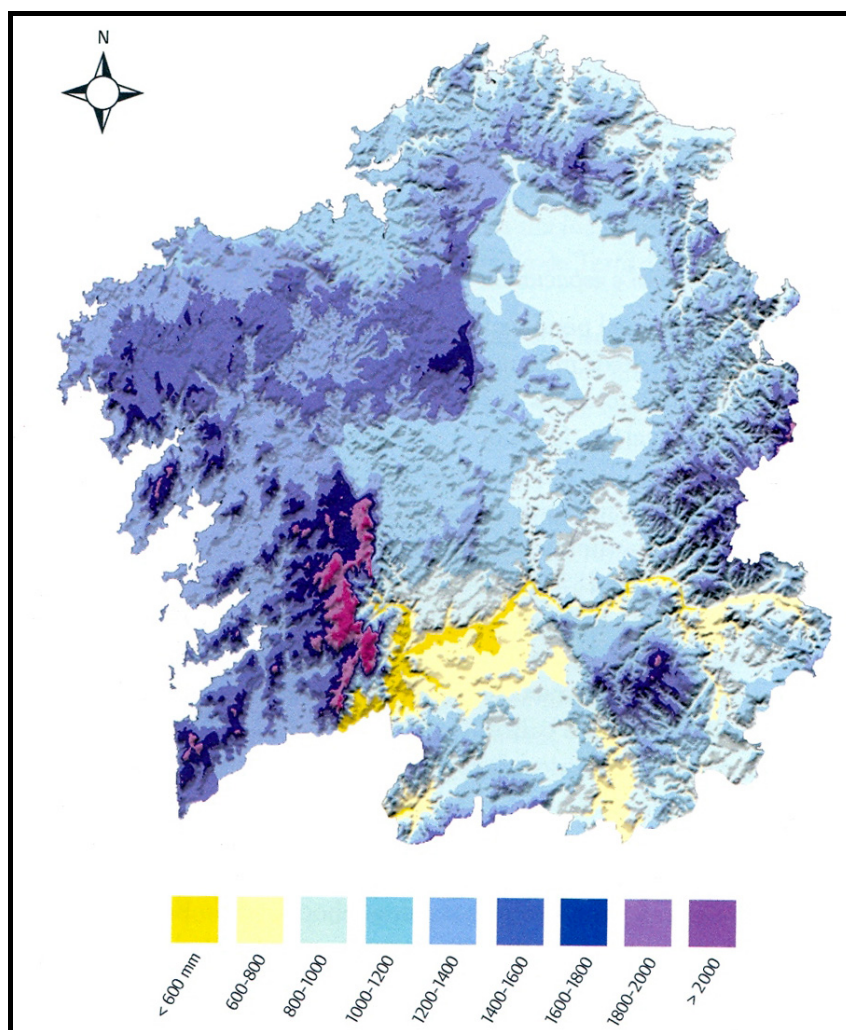


Figura 3.9: “Mapa de precipitación anual acumulada (mm) en Galicia. Adaptado de Naranjo y Pérez Muñuzuri (2006)”

### 3.2 Recopilación de medidas meteorológicas y de inmisión de contaminantes.

Se describen en este apartado los conjuntos de datos meteorológicos y de inmisión recopilados para el desarrollo del estudio, así como la procedencia de los mismos.

#### 3.2.1 Medidas de inmisión de contaminantes

Los datos de inmisión de ozono y óxidos de nitrógeno proceden de varias redes de monitorización diferentes (figura 3.10), que se describen a continuación por orden de importancia, atendiendo al volumen de datos utilizados.

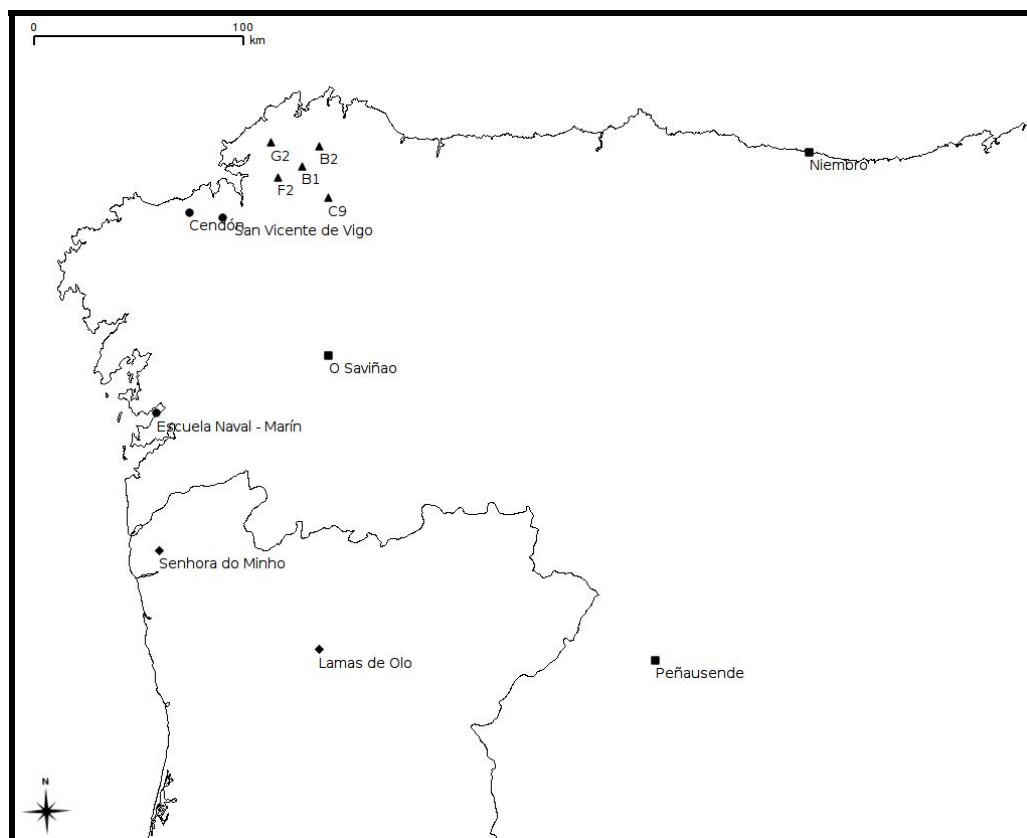


Figura 3.10: “Localización de las trece estaciones principales de calidad de aire cuyos datos se han utilizado para el análisis de los episodios de ozono registrados en el noroeste peninsular. Las estaciones B1, B2, C9, F2 y G2 pertenecen a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa-As Pontes (▲), incluida en la Red Gallega de Calidad del Aire (●), como las estaciones de Marín, Cendón y San Vicente de Vigo; las estaciones de O Saviñao, Niembro y Peñausende (■) están adscritas a la Red EMEP; y las estaciones de Lamas de Olo y Senhora do Minho forman parte de la Red de Calidad de Aire de Portugal (◆)”

#### a) Red Gallega de Calidad de Aire

La Red Gallega de Calidade del Aire (RGCA) cuenta desde 2005 con 71 estaciones fijas, de las cuales 51 tienen conexión real de datos con el Laboratorio de Medio Ambiente de Galicia (LMAG).

Uno de los principales problemas de esta red es que la distribución de la mayor parte de estas estaciones de control viene condicionada por su origen como red de control industrial, de modo que éstas se concentran alrededor de las áreas en las que se acumula la industria pesada de Galicia (centrales térmicas, refinerías, metalúrgica, cementeras, papeleras, etc.).

Por otra parte, sólo 8 estaciones de las 71 miden ozono de forma continua, de las cuales 5 pertenecen a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa - As Pontes, con lo cual están ubicadas en torno a la central térmica, a una distancia máxima de 20 km desde su chimenea.

Las otras tres estaciones que registran ozono en continuo (Cendón, San Vicente de Vigo y Escuela Naval) pertenecen a las redes de SOGAMA (Sociedade Galega do Medio Ambiente, para monitorizar la calidad del aire en las proximidades de la planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos en Cerceda), de la Central Térmica de Meirama y de la papelera ENCE, respectivamente. De las tres, de nuevo las dos primeras estaciones se sitúan en la provincia de A Coruña, en los ayuntamientos de Cambre y Laracha, próximos al área urbana de la ciudad de A Coruña, mientras la perteneciente a ENCE está ubicada en el ayuntamiento de Marín, en la provincia de Pontevedra.

Considerando el dominio de estudio preferente de este trabajo, la base principal son los datos de calidad de aire recogidos en las cinco estaciones situadas en el área de estudio, pertenecientes a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa - As Pontes, cuya descripción se detalla en el apartado 3.3:

- Período: Enero 2002-Agosto 2007 (68 meses)
- Frecuencia horaria
- Estaciones:
  - B1 A Magdalena
  - B2 Louseiras
  - C9 Mourence
  - F2 Fraga Redonda
  - G2 Vilanova

pertenecientes todas ellas a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T As Pontes

- Parámetros: Concentraciones de inmisión de  $O_3$ ,  $NO_2$  y  $NO_x$
- Fuente: Servicio de Control Ambiental de la U.P.T. As Pontes

También se han empleado, como información complementaria durante algunos episodios, datos procedentes de las otras tres estaciones citadas, así como datos de las campañas de medición mediante estaciones móviles realizadas por el Laboratorio de Medio Ambiente de Galicia (LMAG), perteneciente a la Consellería de Medio Ambiente de Galicia. Estas medidas son, de nuevo, concentraciones horarias de inmisión de  $O_3$ ,  $NO_2$  y  $NO_x$ .

#### b) Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo

La Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo a nivel regional está integrada en el Programa EMEP (European Monitoring Evaluation Programme), nacido del Convenio de Ginebra sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia, y en la Red BAPMoN (Background Air Pollution Monitoring Network), del Programa para la Vigilancia de la Atmósfera Global, de la Organización Meteorológica Mundial. Esta red vigila los niveles troposféricos de contaminación atmosférica residual o de fondo, y su sedimentación en la superficie terrestre, en áreas rurales de toda Europa alejadas de los focos de emisión, con el fin de estudiar sus efectos sobre el medio ambiente y protegerlo.

Las mediciones obtenidas de estas estaciones permiten determinar los niveles de contaminación de fondo en áreas rurales, así como evaluar el transporte desde fuentes emisoras situadas a grandes distancias de ellas. Por ello, su emplazamiento debe seguir los criterios de representatividad definidos para cada red, que establecen la anchura de su malla y las distancias mínimas a distintos tipos de focos emisores de contaminación. Una estación ha



de ser representativa, en cuanto a calidad del aire y precipitación, de un área extensa en torno a ella y por esta razón, también han de evitarse perturbaciones locales que puedan tener influencia sobre las mediciones.

Esta Red EMEP en España se compone en la actualidad de 10 estaciones (figura 3.11), de las cuales, por su proximidad geográfica, se han utilizado 3 para desarrollar este estudio (tabla 3.0), descritas en el apartado 3.3. Las estaciones seleccionadas han sido O Saviñao, en la provincia de Lugo, situada en el ayuntamiento de su mismo nombre, Peñausende, situada en la provincia de Zamora, y Niembro, situada en el ayuntamiento de Llanes, en Asturias.

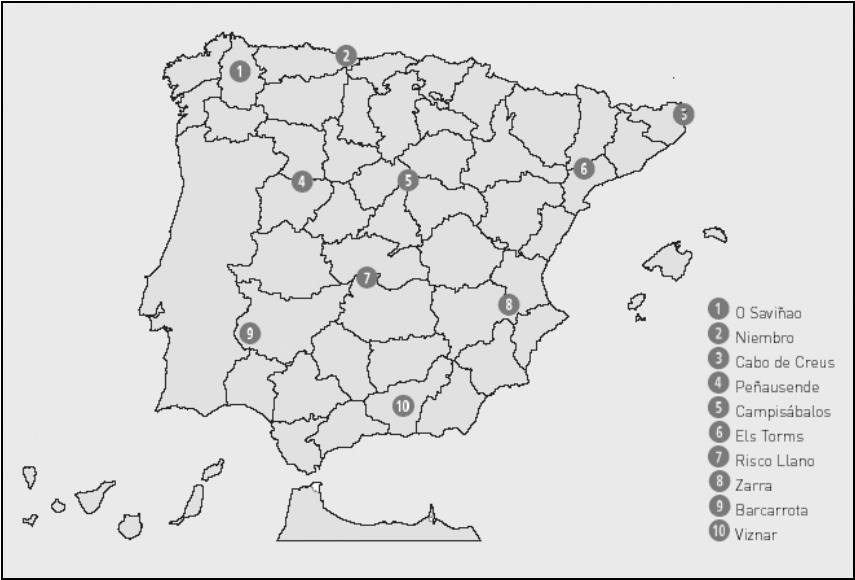


Figura 3.11: “Localización de las diez estaciones pertenecientes a la Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo integradas en la Red EMEP (fuente: Ministerio de Medio Ambiente)”

La estación de O Saviñao ha sido elegida por ser la única radicada en Galicia, en el sur de la provincia de Lugo, mientras la selección de Peñausende y Niembro es útil a efectos comparativos, proporcionando datos útiles para establecer el posible origen de las masas de aire enriquecido en ozono, en el caso de episodios afectados por el transporte de contaminantes a larga distancia, ya que se trata de las estaciones de fondo más próximas a la Comunidad Autónoma Gallega.

Estación	Coordenada X (UTM) (km)	Coordenada Y (UTM) (km)	Altitud (ASL) (m)	Red
ES0016R-O Saviñao	606.1	4721.2	506	EMEP
ES0008R-Niembro	350.3	4811.7	134	EMEP
ES0013R-Peñausende	259.9	4574.3	985	EMEP
Senhora do Minho	525.4	4627.9	777	Portugal
Lamas de Olo	601.1	4580.8	1086	Portugal

Tabla 3.0: Estaciones de monitorización de calidad de aire pertenecientes a la Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo (programa EMEP) y la Rede da Calidade do Ar de Portugal, cuyos datos han sido utilizados a efectos comparativos en este estudio. Las coordenadas son Universal Transverse Mercator (UTM) y huso 29T, salvo las estaciones de Niembro y Peñausende, con huso 30T. ASL indica altura sobre el nivel del mar.

Los medidas de inmisión recogidas en las tres estaciones de esta red son los siguientes:

- Período: Enero 2002-Agosto 2007 (68 meses)
- Frecuencia horaria
- Estaciones:
  - O Saviñao – Lugo
  - Niembro (Llanes) – Oviedo
  - Peñausende – Zamora
- Parámetros: Concentraciones de inmisión de O<sub>3</sub> (datos de NO<sub>2</sub> y NO disponibles también para la estación de O Saviñao)
- Fuente: Laboratorio de Medio Ambiente de Galicia (LMAG) y Ministerio de Medio Ambiente

c) Red de Calidad de Aire de Portugal

La “Rede da Calidade do Ar de Portugal” depende de la Agencia Portuguesa do Ambiente, y está organizada en 7 redes regionales de monitorización de la calidad del aire. En este análisis se han utilizado de forma sistemática los datos suministrados por 2 estaciones (tabla 3.0), Lamas de Olo y Senhora do Minho, pertenecientes a la “Rede de Qualidade do Ar do Norte”, que está compuesta por 23 estaciones en total.

Se han escogido las estaciones de Senhora do Minho (litoral) y Lamas de Olo (interior) por ser estaciones rurales con influencia de fondo, siendo equiparables por su entorno a las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T Endesa-As Pontes. La principal diferencia estriba en la mayor altitud de las estaciones portuguesas, ambas por encima de los 750 m, altitudes semejantes a la estación EMEP de Peñausende, en Zamora. Además estas estaciones son las rurales de fondo más septentrionales en Portugal, con lo cual las posibles masas aéreas que se transporten desde territorio portugués hacia la Comunidad Gallega han de atravesar su vertical con alta probabilidad.

Los medidas de inmisión recogidas en las dos estaciones de esta red son los siguientes:

- Período: Febrero 2004 – Agosto 2007 (Lamas de Olo), Marzo 2005- Agosto 2007 (Senhora do Minho)
- Frecuencia horaria
- Estaciones:
  - Senhora do Minho – Viana do Castelo
  - Lamas de Olo – Vila Real
- Parámetros: Concentraciones de inmisión de O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> y NO
- Fuente: Instituto do Ambiente (Agência Portuguesa do Ambiente, 2008)

Una vez más, se han empleado datos procedentes de otras estaciones de las redes de Portugal, dada la carencia de datos de ozono procedentes de las dos estaciones citadas durante el período 2002-2003, pues hasta el año 2004 no se instaló la estación de Lamas de Olo, seguida de Senhora do Minho en el año 2005.

d) Otras redes

Se han empleado datos de otras redes de monitorización de calidad del aire durante el análisis de los episodios seleccionados, no de forma regular, pero sí con carácter auxiliar en determinados episodios, para verificar algunos resultados procedentes de simulaciones de calidad de aire, o bien para establecer hipótesis de transporte. El uso de las medidas de concentraciones de inmisión en las estaciones de estas redes ha sido poco relevante para el



desarrollo del análisis, aunque se citan aquí ya que se han considerado en alguno de los episodios del período 2002-2003.

Las redes utilizadas incluyen la Red de Medida de la Contaminación Atmosférica en Castilla-León (Consejería de Medio Ambiente, 2010), formada por 72 estaciones, de las cuales se utilizaron únicamente 25 para medidas horarias de ozono y dióxido de nitrógeno, y la Red de Calidad de Aire de Asturias, gestionada por el Principado de Asturias (Sistema de Información Ambiental del Principado de Asturias, 2008), con 19 estaciones y datos procedentes de medias diarias de ozono y dióxido de nitrógeno, como únicos disponibles.

### 3.2.2 Registros meteorológicos

Las medidas meteorológicas de superficie utilizadas para el desarrollo del estudio proceden de las citadas cinco estaciones automáticas pertenecientes a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T As Pontes:

- Período: Enero 2002-Agosto 2007 (68 meses)
- Frecuencia horaria
- Estaciones:
  - D1 A Mourela
  - B1 A Magdalena
  - B2 Louseiras
  - C9 Mourence
  - F2 Fraga Redonda
  - G2 Vilanova

pertenecientes todas ellas a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T As Pontes

- Parámetros:
  - Temperatura a 2 m
  - Temperatura a 10, 30 y 80 m \*
  - Velocidad y dirección de viento a 10 m
  - Velocidad y dirección de viento a 80 m \*
  - Precipitación \*
  - Humedad relativa \*
  - Insolación \*

(\*) Los datos marcados con asterisco sólo se han recogido en la estación D1

- Fuente: Servicio de Control Ambiental de la U.P.T. As Pontes

Los registros meteorológicos en altura (sondeos aerológicos) que se han empleado han sido realizados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM, Ministerio de Medio Ambiente), en la ciudad de A Coruña, y por MeteoGalicia (Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible), en la localidad de Santiago de Compostela.

Los radiosondeos operados por el INM proporcionan datos de temperatura, temperatura de rocío, velocidad y dirección de viento, entre las alturas de 1000 hPa y 100 hPa (entre el nivel de suelo y 15-18 km de altura), con intervalos de 100 hPa, lo que dificulta el análisis de la estructura vertical de la capa límite atmosférica. Se dispone de dos sondeos diarios, a las 00 UTC y a las 12 UTC, respectivamente, cuyos datos han sido obtenidos a partir de la base de datos pública de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2008). Los dos radiosondeos diarios realizados por MeteoGalicia se lanzan a las 06 UTC y a las 18 UTC,

proporcionando los mismos datos que el radiosondeo del INM, pero mucha mayor resolución vertical (10-50 m), disponibles a través de MeteoGalicia (MeteoGalicia, 2009).

### 3.3 Caracterización de estaciones.

La recogida y utilización de datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos procedentes de estaciones de monitorización obliga a realizar una clasificación previa de las mismas, dado que su emplazamiento puede condicionar en gran medida los resultados obtenidos a partir de la interpretación de los datos de una red de medida. Por otra parte, la clasificación de las estaciones dentro de una red de calidad ambiental es un problema complejo, debido a los variados factores que afectan a la dinámica de contaminantes en un punto (geográficos, meteorológicos, antropogénicos), que además interaccionan entre ellos de formas diversas. A continuación se realiza una descripción de la situación geográfica y las características orográficas del emplazamiento de las cinco estaciones cuyos registros han sido empleados para identificar los episodios analizados, incluidas todas ellas en la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T As Pontes. Posteriormente se establece su clasificación en función de los niveles de ozono troposférico y precursores registrados en ellas, atendiendo a criterios empleados por la legislación europea relativa a calidad del aire.

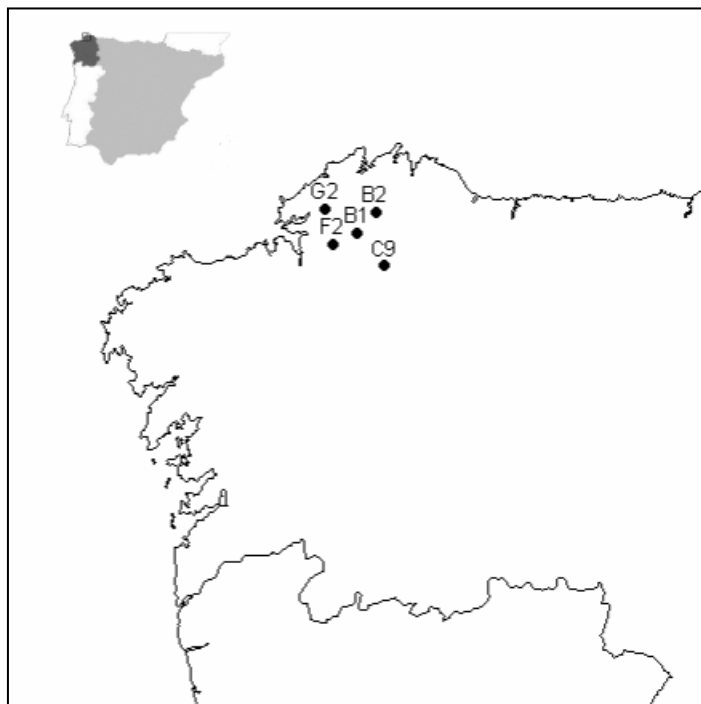


Figura 3.12: “Localización geográfica de las cinco estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes utilizadas para la selección de episodios durante el período de análisis (B1-A Magdalena, B2-Louseiras, C9-Mourence, F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova). La estación D1-A Mourela, que recoge únicamente datos meteorológicos, está situada a tan escasa distancia de la estación B1 que aparecería solapada con ésta, de modo que no ha indicado en el mapa ”

#### 3.3.1 Localización geográfica

Dentro del área de estudio descrita previamente se sitúan cinco estaciones (figura 3.12, tabla 3.1) pertenecientes a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T As Pontes (B1-A Magdalena, B2-Louseiras, C9-Mourence, F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova), cuyos datos han sido la base de la identificación de los episodios con alta concentración superficial de

ozono troposférico. A continuación se describe la situación y las características topográficas del emplazamiento de cada una de ellas.

Estación	Coordenada X (UTM) (km)	Coordenada Y (UTM) (km)	Altitud (ASL) (m)	Distancia al mar (km)
B1 - A Magdalena	593.3	4811.4	363	28.0
B2 - Louseiras	601.8	4821.1	540	18.0
C9 - Mourence	606.0	4796.4	465	41.0
F2 - Fraga Redonda	581.9	4806.3	480	16.0
G2 - Vilanova	578.5	4822.9	290	11.0

Tabla 3.1: Estaciones de monitorización de calidad de aire pertenecientes a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T Endesa-As Pontes, usadas como base en este estudio. Las coordenadas son Universal Transverse Mercator (UTM), huso 29T. ASL indica altura sobre el nivel del mar.

#### a) Estación B1-A Magdalena

La estación B1-A Magdalena se encuentra en la villa de As Pontes, con 10318 habitantes según el último censo, dentro del ayuntamiento del mismo nombre. Su emplazamiento se sitúa al borde del casco urbano, en un terreno llano de carácter periurbano, rodeado de huertas y zonas verdes, pero con algunas viviendas en sus alrededores, de modo que se debería considerar una estación de carácter suburbano (figura 3.13).



Figura 3.13: “Localización geográfica y topografía del entorno de la estación de calidad de aire B1- A Magdalena. Destaca su situación urbana, en el pueblo de As Pontes, y la proximidad de la autovía AG-64 Ferrol-Villalba”

El pueblo de As Pontes se encuentra en una pequeña depresión terciaria, por donde discurre el río Eume en dirección SSW, de modo que la estación B1 presenta una cota de 363 m, bastante inferior al entorno próximo: la geomorfología del área se caracteriza por la presencia de sierras y montes de baja y media altura (entre 600 m y 500 m), entre las que se encaja una extensa red de drenaje. En el entorno próximo, destacan la Sierra de Faladoira, situada al nordeste, la Sierra de Queixiro al suroeste y la Sierra de O Forgoselo al oeste. También cabe citar los Montes do Cauce Ancho con 677 m situados a unos 5 km al NE de la estación, aunque las mayores alturas del área considerada se localizan a unos 20 km al Este de la estación, en la zona de la sierra de O Xistral, con cota máxima de 1.032 m y la sierra de A Carba (908 m). El embalse de A Ribeira, en el río Eume, se sitúa unos 2 km al NE de la estación B1, entre a Serra da Faladoira y los Montes do Cauce Ancho.

#### b) Estación B2-Louseiras

La estación B2-Louseiras está situada en el ayuntamiento de Muras, en la provincia de Lugo, a unos 13 km en dirección NE de la villa de As Pontes, en un área de orografía muy compleja (figura 3.14). Se trata de una estación de tipo rural, ya que la población de cierta entidad más cercana se encuentra a unos 9 km en línea recta, Santa María de Ourol, con 216 habitantes según el censo de 2007 (Instituto Nacional de Estadística, 2009). En los alrededores de la estación, el uso del suelo está dominado por formaciones arbóreas de eucalipto y pino, mezclados con pastos arbustivos en las zonas más elevadas y pequeñas zonas de pastizal herbáceo en torno a los dos núcleos de población próximos, pero prácticamente deshabitados (As Ameixiras y O Rego, con 2 habitantes según el padrón municipal de 2007).



Figura 3.14: “Localización geográfica y topografía del entorno de la estación de calidad de aire B2 – Louseiras, destacando el relieve complejo de la zona, con alturas máximas de 700 m y su situación próxima al nacimiento del río Sor”

La cota de la estación B2 es la más elevada de las cinco estaciones utilizadas dentro de la Red de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa - As Pontes, con 540 m, al localizarse próxima a un cordal que alcanza los 601 m, en las estribaciones occidentales de la Serra da Gañidoira.



Se sitúa próxima a la cima del citado cordal, en la vertiente oeste, próxima al nacimiento de un arroyo que circula por un estrecho valle en dirección SE-NO. A su vez, éste se abre a un nuevo valle, en dirección SSO-NNE, que desemboca en el valle del río Sor, conformando un relieve complejo, dominado por las suaves cumbres abombadas, que alternan con múltiples valles.

### c) Estación C9-Mourence

La estación C9-Mourence se encuentra en el ayuntamiento de Vilalba, próxima a la parroquia de San Xulián de Mourence, en plena Terra Chá lucense, a 1.5 km al noroeste del casco urbano de la población de Vilalba, y a 12 km al suroeste de la villa de As Pontes. La estación se ha clasificado de tipo suburbano, por su cercanía a Vilalba, capital del municipio con 5675 habitantes en 2007 (Instituto Nacional de Estadística, 2009), y a varias carreteras, siendo la más cercana la carretera autonómica LU-861, Vilalba-As Pontes; a pesar de ello, su emplazamiento se sitúa en un área rural, dominada por cultivos anuales y áreas de pastos, con algunas manchas boscosas de especies caducifolias.

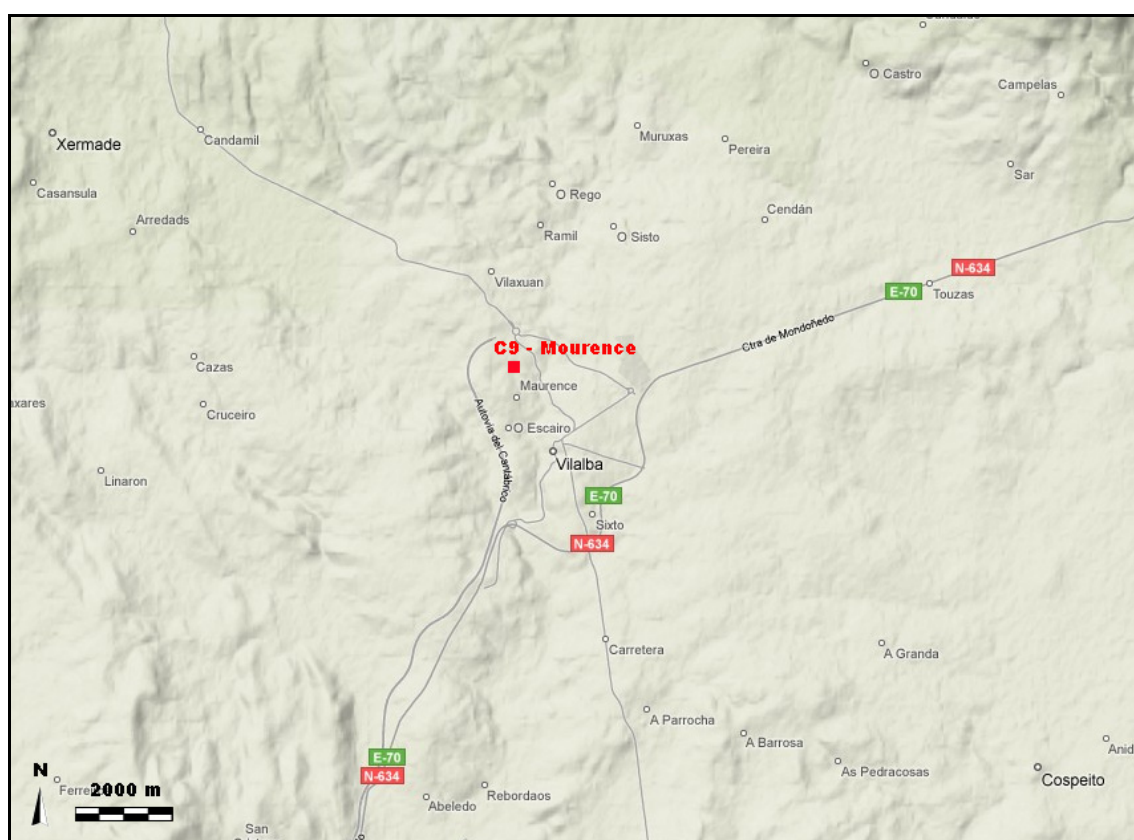


Figura 3.15: “Localización geográfica y topografía del entorno de la estación de calidad de aire C9 - Mourence, destacando la topografía llana de la zona y su proximidad al casco urbano de Vilalba, así como a vías de comunicación como la carretera de Mondoñedo y la autovía del Cantábrico”

La estación C9 se sitúa a 465 m de altura, pero en una zona totalmente llana (figura 3.15), en el corazón de la Terra Chá, altiplanicie central de la provincia de Lugo, sin accidentes orográficos reseñables en sus alrededores, salvo la Serra do Xistral, en dirección N-NE. La Serra do Xistral presenta alturas máximas de unos 1000 m, y sus estribaciones más meridionales se encuentran a unos 11 km en línea recta de la estación C9-Mourence. La influencia meteorológica de estos montes sobre la zona de Vilalba estriba fundamentalmente en el apantallamiento de los vientos de componente NE característicos del período estival gallego.

#### d) Estación F2-Fraga Redonda

La estación F2-Fraga Redonda se localiza al oeste del municipio de As Pontes, en una zona de baja densidad de población, siendo las localidades más próximas A Capela (981 habitantes en 2007), más de 7 km al NO, As Pontes, 11 km al ENE, y Pontedeume (4735 habitantes en 2007, casi 15 km al oeste. Su emplazamiento aislado, muy próximo al embalse del Eume, en pleno Parque Natural de “As Fragas do Eume”, así como la gran distancia a carreteras y núcleos de población de entidad, han llevado a caracterizar esta estación como de tipo “rural”. Además, los usos de suelo en el entorno de la estación son pastos (cultivos forrajeros) y manchas aisladas de pino y eucalipto.

La cota altitudinal de la estación alcanza los 480 metros, situándose en la margen derecha del río Eume (figura 3.16), a media ladera este del embalse del Eume, y a menos de 1500 metros del mismo. En la zona próxima a la estación, el río circula de sureste a noroeste, aunque pronto recupera su dirección característica este - oeste. La estación F2 se encuentra en un pequeño y poco marcado valle que se extiende desde el embalse en dirección norte, cerrándose a unos 600 m de altitud. La zona presenta una orografía compleja, con el río Eume discurriendo encañonado aguas abajo, una vez pasado el embalse. Al norte y nordeste de la estación F2 - Fraga Redonda el terreno es ondulado, culminando en una serie de montes aislados entre los 550 m y los 700 m, mientras que en dirección este la topografía es más suave, con pequeñas ondulaciones entre los 300 m y 400 m. Hacia el sur se encuentra el embalse, con una margen izquierda más escarpada, limitada por la Serra do Queixeiro, con alturas entre 550 m y 650 m.

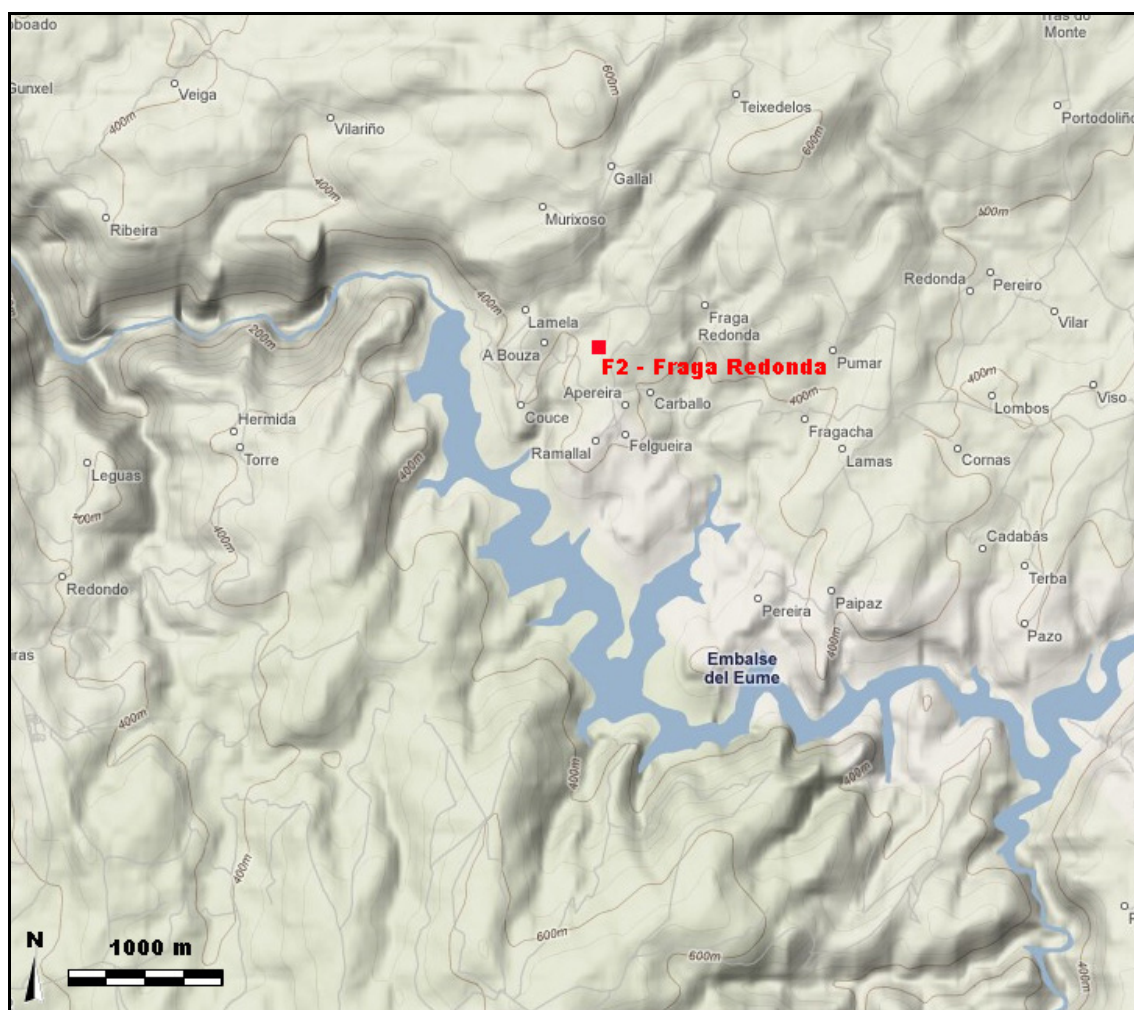


Figura 3.16: “Localización geográfica y topografía del entorno de la estación de calidad de aire F2 – Fraga Redonda, destacando su proximidad al embalse del Eume, en una zona de escasa densidad de población y sin vías de comunicación cercanas”

La presencia del embalse favorece la formación de brisas de valle, y potencia la entrada de brisas marinas desde la ría de Pontedeume, que aprovechan el curso del río Eume para penetrar tierra adentro. Por tanto, el régimen eólico en esta estación está muy afectado por los efectos locales y topográficos del viento, como se comprobará posteriormente en el análisis meteorológico (apartado 3.5.4).

#### e) Estación G2-Vilanova

La estación G2-Vilanova (figura 3.17) pertenece al ayuntamiento de San Sadurniño, y está situada 16 km al noreste de Ferrol (67213 habitantes, según el padrón de 2007), 18 km al noroeste de As Pontes y casi 4 km al noreste de Santa María de San Sadurniño (862 habitantes en 2007). Sin embargo, la proximidad a la costa (11 km a la ría de Ferrol y menos de 12 km a la costa de Valdoviño, al noroeste) y la influencia del cinturón urbano de la ciudad de Ferrol hacen de esta zona un área densamente poblada y con numerosos núcleos de población (entre 150 y 400 habitantes), lo cual favorece la presencia de industrias y vías de comunicación. Esta situación conlleva la clasificación de la estación G2-Vilanova como “estación rural”, pero con cierta influencia del tráfico e industrias: aunque la ocupación de suelo en el entorno de la estación está dominada por los prados, cultivos anuales y masas de eucalipto y la distancia a núcleos importantes de población sea elevada, existen algunas empresas diseminadas por el área (por ejemplo, de fabricación de tableros de madera) y una densa red de carreteras.

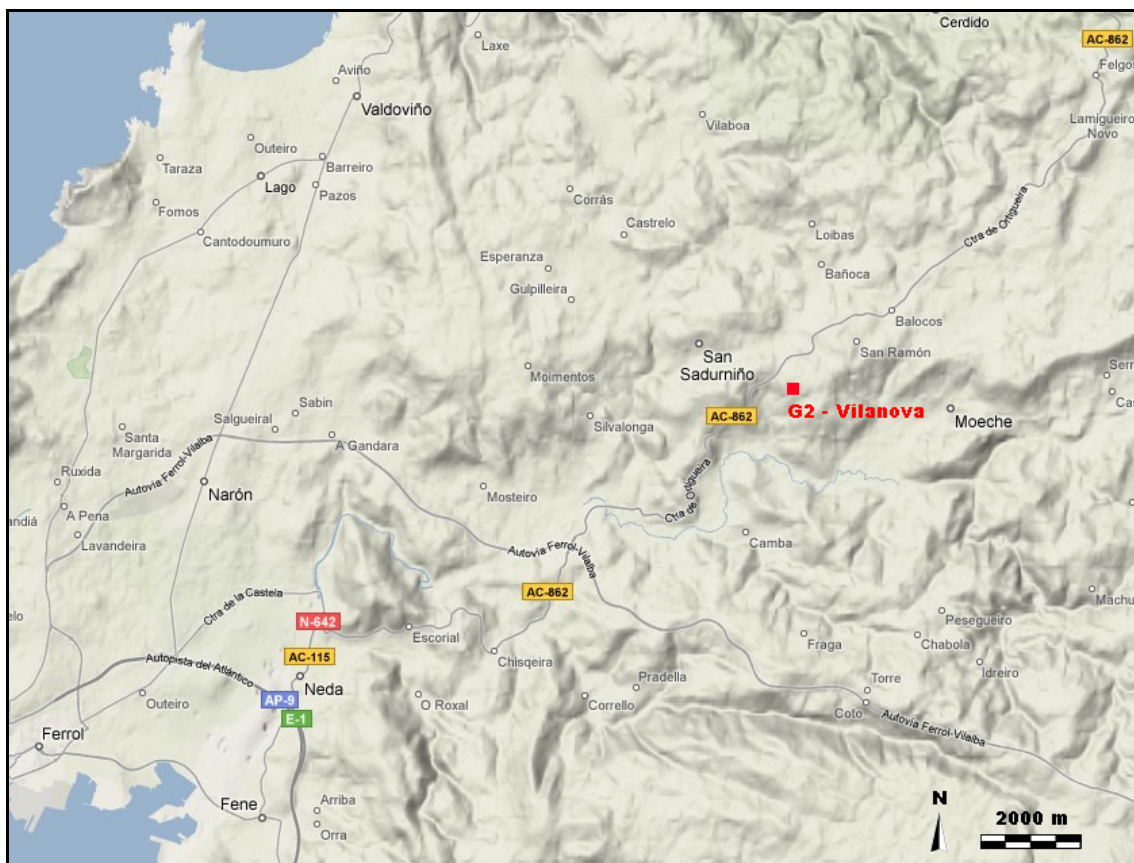


Figura 3.17: “Localización geográfica y topografía del entorno de la estación de calidad de aire G2 – Vilanova, destacando su proximidad al Atlántico y al núcleo urbano de Ferrol, así como su cercanía a la carretera de Ortigueira. El relieve es suave, con alturas entre los 100 m y los 300 m ”

En cuanto a la topografía, la cota altitudinal de la estación es escasa, con 290 metros, dada su proximidad al mar. La estación se ubica en el valle del río Grande de Xubia, a media ladera de la margen derecha del río, dentro de un área de relieve ondulado, pero con alturas escasas, entre los 200 m y los 300 m. La Serra de Forgoselo se encuentra en dirección Sur, a unos 7 km de la estación, pero con alturas inferiores a 600 m, mientras que unos 14 km en dirección Este



aparece la Serra da Faladoira, con altitudes ligeramente superiores, aunque por debajo de 800 metros.

A nivel meteorológico, el principal factor topográfico local que afecta a esta estación es la proximidad a la costa, lo que favorece la aparición de brisas marinas, y la posible formación de brisas de valle.

### 3.3.2 Clasificación

En este trabajo se ha intentado seguir la clasificación más reciente basada en las establecidas por la Unión Europea, en la directiva 2002/3/CE, relativa al ozono en el aire ambiente (European Union, 2002), en la cual se indica que las estaciones de monitorización deben ser clasificadas en función de las condiciones del entorno que las rodea (actividades antrópicas propias en la zona, uso de suelos y tipo y cantidades de emisiones locales), estableciendo cuatro tipos diferentes, que se detallan en la tabla 3.2.

Nivel 1	Situación según el entorno local y morfología del paisaje
Urbano	Localización en el núcleo densamente poblado de las ciudades, pero no afectadas directamente por fuentes de emisiones locales como tráfico o industrias
Suburbano	Localización en los arrabales de la ciudad, incluyendo áreas adyacentes, afectadas directamente por las emisiones de la ciudad de mayor tamaño
Rural	Establecidas en zonas rurales, que podrían incluir pueblos, pudiendo estar bajo la influencia de penachos industriales o urbanos
Rural de fondo	Situación en áreas rurales fuera de núcleos poblados como ciudades o conurbaciones, y muy lejos de grandes fuentes de emisiones

Tabla 3.2: Clasificación de estaciones de monitorización: nivel 1, según su posición en función del grado de urbanización del entorno próximo y la morfología del paisaje.

Sin embargo, encuadrar una estación dentro de una de las cuatro categorías enumeradas por la citada directiva puede presentar algunas dificultades. Existen dos posibles modos de determinarlo, como son la observación directa de los alrededores del emplazamiento de la estación, o bien a posteriori mediante un apropiado manejo de los datos registrados en la propia estación (European Union, 1999b). Siguiendo esta última metodología, un trabajo realizado en varias zonas de Francia (Fromage, 1996), y recogido en estudios previos a la elaboración de la Directiva, establece que las estaciones pueden agruparse en tres tipos de acuerdo con la tasa medida  $O_3/O_x$ , con  $O_x = O_3 + NO_2$ :

- áreas urbanas: relaciones  $O_3/O_x$  bastante bajas durante todo el año, oscilando entre 0.10 en invierno y 0.5 en verano, indicando que el oxidante que domina es el dióxido de nitrógeno
- áreas rurales -regionales: amplia variación de la tasa  $O_3/O_x$ , desde 0.20 en invierno a 0.95 en verano, lo que significa que el ozono domina en verano, pero no en invierno, debido a la influencia de las emisiones de las ciudades
- áreas rurales de fondo: la ratio  $O_3/O_x$  es la más alta, próxima a 1.00 durante todo el año ( $>0.80$ ), al dominar el ozono dentro de los compuestos oxidantes

Se ha aplicado este análisis (figura 3.18a) a las cinco estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes (B1, B2, C9, F2 y G2) empleadas como base para identificar los episodios analizados, durante el período 01/2002 – 07/2007, a partir de



medias mensuales obtenidas con datos horarios de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno, extrayéndose las siguientes conclusiones:

- las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda podrían considerarse como estaciones rurales de fondo, al superar durante todo el período analizado ratios  $O_3/O_x$  superiores a 0.92 y 0.87, respectivamente
- la estación G2-Vilanova también podría considerarse como rural de fondo, pues oscila entre tasas de 0.81 y 0.95; sin embargo, presenta una oscilación mucho más marcada a lo largo del ciclo anual, claramente asociada a los períodos estivales e invernales
- las estaciones B1-A Magdalena y C9-Mourence se encuadrarían dentro de las estaciones rurales-regionales, pues presentan relaciones  $O_3/O_x$  entre 0.67 y 0.95, de nuevo relacionadas con los meses de invierno y verano, y siendo más acusadas en B1- A Magdalena.

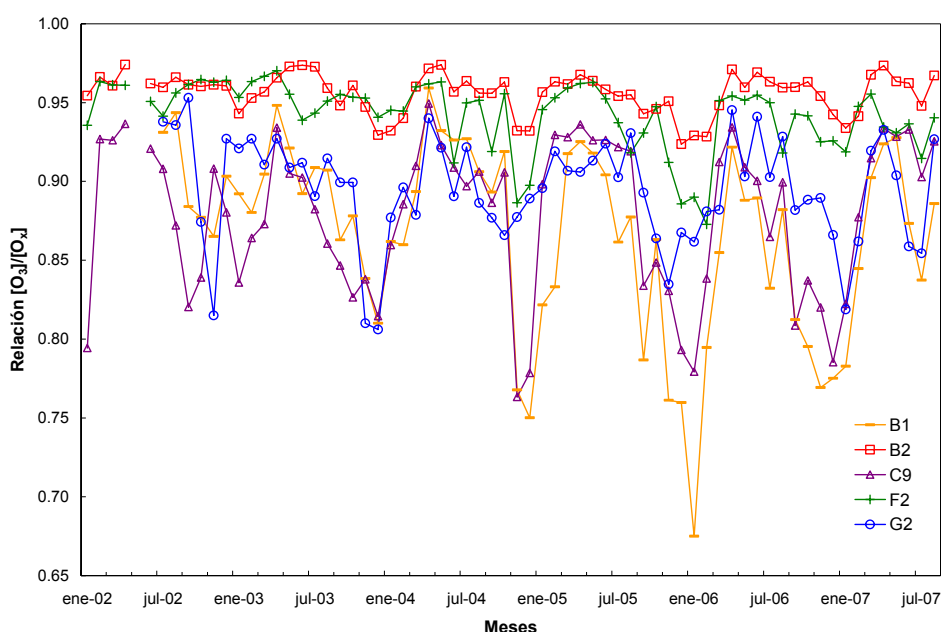


Figura 3.18a: “Tasa mensual  $[O_3]/[O_x]$ , con  $O_x = O_3 + NO_2$ , en las cinco estaciones de monitorización de la Red Gallega de Calidad de Aire (B1-A Magdalena, B2-Louseiras, C9-Mourence, F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova) durante el período Enero 2002-Agosto 2007”

Estos resultados no son concluyentes, pues si se tiene en cuenta la mencionada clasificación de la Directiva 2002/3/CE (European Union, 2002) y del Real Decreto 1796/2003 (Ministerio de la Presidencia, 2004), que la transpone al Estado Español, la clasificación de las cinco estaciones sería ligeramente diferente, al considerar su entorno:

- las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda podrían agruparse como “estaciones rurales”, al ser estaciones situadas en un entorno rural, y alejadas de núcleos de población importantes (más de 12 km a villas de 10.000 habitantes –As Pontes y Pontedeume-, y más de 20 km a núcleos con población superior a los 50.000 habitantes –Ferrol y A Coruña-) y de vías de comunicación principales (más de 3 km a la carretera provincial más próxima); sin embargo, no alcanzan el rango de estaciones rurales de fondo, pues en ocasiones están bajo la influencia del penacho industrial de la central térmica U.P.T. Endesa-As Pontes, distante unos 12 km, aproximadamente
- las estaciones B1-A Magdalena y C9-Mourence serían consideradas “estaciones suburbanas”, pues están situadas en los arrabales de núcleos de población (As Pontes y Vilalba) con más de 10.000 habitantes, o en sus proximidades (a menos de 2 km),

respectivamente, y presentan influencia de emisiones de tráfico, debido a las vías de circulación próximas

- la estación G2-Vilanova presenta un emplazamiento aislado, dentro de un entorno rural, alejada más de 10 km de cualquier núcleo de población de más de 5.000 habitantes, pero se encuentra próxima (menos de 1 km en línea recta) a la carretera nacional AC-862 Ferrol-Ortigueira; por tanto podría considerarse “estación rural”, pero con cierta influencia de emisiones del tráfico

Por tanto, el problema que se plantea en alguna de estas estaciones es que la clasificación se revela insuficiente, siendo fácil establecer el tipo de emplazamiento, pero no tan sencillo dirimir la categoría debido a la posible influencia de las fuentes de emisión. Sin embargo, se mantendrá la clasificación anterior por ser más restrictiva para asegurar la representatividad de las medidas de ozono, aunque se podría optar por establecer una clasificación más refinada, siempre coherente con las ya citadas clasificaciones establecidas por la Unión Europea, como han hecho algunos países como Francia (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, 2002) o el Reino Unido. No se ha considerado en este caso, dado que se trata sólo de cinco estaciones, y todas de características no muy diferentes.

En resumen, la clasificación de las estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes, establecida siguiendo la directiva 2002/3/CE, es la que sigue:

- Estaciones de tipo suburbano con influencia de tráfico: B1-A Magdalena y C9-Mourence
- Estaciones de tipo rural con influencia de tráfico: G2-Vilanova
- Estaciones de tipo rural de fondo: B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda

Este esfuerzo de clasificación no se aplicó al resto de estaciones utilizadas en el estudio pues, o bien ya están perfectamente caracterizadas como estaciones rurales de fondo (caso obligado de las estaciones EMEP de la Red Española de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de Fondo), o bien se disponía de la clasificación realizada por la red de monitorización a la que pertenecen (estaciones pertenecientes a la Red de Calidad de Aire de Portugal y a las redes regionales). Finalmente, las tres estaciones de la Red Gallega de Calidad de Aire (Cendón, San Vicente de Vigo y Escuela Naval) se han catalogado como suburbanas con influencia de tráfico atendiendo a su entorno, pero no se ha llevado a cabo un análisis más exhaustivo de sus medidas dado que su contribución al estudio es complementaria.

La orografía compleja del área de estudio conlleva la necesidad de introducir otro nivel de clasificación más, al afectar a la dinámica del ozono, como ya se ha demostrado en otros trabajos en zonas complejas, como la cuenca mediterránea (Millán et al., 2000). Este nuevo nivel estaría relacionado con la situación relativa de las estaciones dentro de la topografía del área, según se describe en la tabla 3.3.

Nivel 2	Situación orográfica relativa en el noroeste peninsular
AI	Altura en el interior
ME	Media elevación (ladera de valle) en distancias intermedias entre la costa y el interior
CB	Costa a baja altura
MI	Media elevación en el interior

Tabla 3.3: Clasificación de estaciones de monitorización: nivel 2, según su posición en función de la topografía y orografía del noroeste peninsular.

La clasificación final de las principales estaciones de monitorización que se han utilizado para la elaboración de este estudio y, sobre todo, para el análisis episódico se presenta en la tabla 3.5, que incluye también las fuentes de emisión predominantes, de acuerdo con la Decisión 97/101/CE (European Union, 1997), según se explica en la tabla 3.4.

Influencia	Tipo de estación en relación con las fuentes de emisión predominantes
Tráfico	Nivel de contaminación influenciado principalmente por las emisiones procedentes de una calle o carretera próxima
Industrial	Nivel de contaminación influido por fuentes industriales aisladas o zonas industriales
Fondo	Nivel de contaminación no influenciado esencialmente por una única fuente, sino por la contribución integrada de todas las fuentes a barlovento de la estación

Tabla 3.4: Clasificación de estaciones de monitorización: nivel 3, según su relación con las fuentes de emisión predominantes (Decisión 97/101/CE).

Estación	Nivel 1	Nivel 2	Influencia
B1-AMagdalena	Suburbana	MI	Tráfico
B2-Louseiras	Rural	ME	Fondo
C9-Mourence	Suburbana	MI	Tráfico
F2-Fraga Redonda	Rural	ME	Fondo
G2-Vilanova	Rural	CB	Industrial
Cendón	Rural	CB	Industrial
San Vicente de Vigo	Rural	CB	Industrial
Escuela Naval Marín	Suburbana	CB	Tráfico
O Saviñao	Rural	MI	Fondo
Niembro	Rural	CB	Fondo
Peñausende	Rural	AI	Fondo
Senhora do Minho	Rural	ME	Fondo
Lamas de Olo	Rural	AI	Fondo

Tabla 3.5: Clasificación de las principales estaciones de monitorización de calidad de aire cuyos datos se han empleado para realizar el análisis episódico.

La caracterización de las estaciones utilizadas se ha completado con un análisis de la relación funcional existente entre las estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes, durante los episodios seleccionados por sus altos niveles de inmisión de ozono troposférico. Para ello se ha calculado el grado de dependencia mutua entre las concentraciones de inmisión de ozono registradas entre todas las parejas de estaciones de la citada red durante dichos episodios, a través del denominado coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ ).

El objetivo de este análisis es reconocer estaciones con comportamientos similares durante los períodos establecidos, y considerar la posibilidad de prescindir de alguna de ellas durante el estudio de los episodios, en el caso de que la correlación sea lo suficientemente elevada (próxima a la unidad).

La figura 3.18b muestra las correlaciones obtenidas para cinco de las diez posibles parejas de estaciones, en concreto para aquellas cuyos valores se consideran de mayor representatividad.

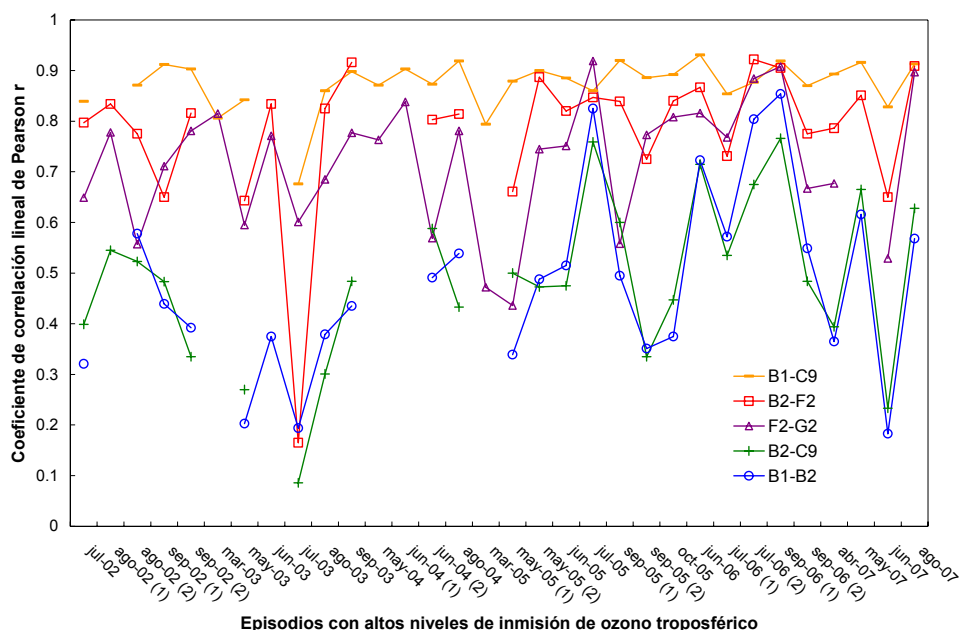


Figura 3.18b: “Correlaciones de inmisión de ozono troposférico entre estaciones de la Red de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes durante los episodios con altos niveles de inmisión de ozono troposférico, expresadas mediante el coeficiente de correlación lineal de Pearson  $r$ . Se han desechado los periodos en los que el número de datos disponibles era inferior al 80% de total”

Esta figura 3.18b indica que las correlaciones más elevadas se obtienen entre las estaciones de características semejantes, como era esperado, siendo el par B1-A Magdalena y C9-Mourence el más destacado, con valores del coeficiente de correlación superiores a 0.85 en más del 80% de los episodios analizados, seguido de las parejas B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, y a mayor distancia, del par F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova.

El caso de B1-A Magdalena y C9-Mourence es paradigmático, al ser estaciones del mismo tipo y estar relativamente próximas: ambas son estaciones suburbanas, con cierta influencia del tráfico, y situadas en una zona interior de altitud similar, con una distancia entre ellas próxima a los 20 km. Su alta correlación lineal permitirá, en determinados episodios, prescindir del análisis de los datos recogidos en una de ellas, ya que el comportamiento de ambas es bastante similar. Sin embargo, la relevancia de los datos registrados en estas dos estaciones no es demasiado grande, dado su carácter suburbano y la influencia de emisiones de tráfico.

La correlación entre B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda es también acusada, aunque menor que en el caso anterior, tratándose de nuevo de dos estaciones con la misma caracterización: estaciones rurales de fondo, situadas a una distancia de la costa y a una altura semejante. Sin embargo, el emplazamiento de la estación F2-Fraga Redonda está a media ladera de valle, mientras B2-Louseiras se sitúa muy próxima a la divisoria del mismo, lo cual puede causar posibles fenómenos locales de diferente intensidad (brisas de valle, inversiones térmicas, etc.). Por tanto, a pesar de la elevada correlación, ambas estaciones se podrán analizar por separado.

Finalmente se muestra la correlación entre F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova, sensiblemente inferior a las dos anteriores, aunque ambas son estaciones de fondo y la distancia entre ambas no supera los 15 km: el diferente entorno topográfico y una ligera influencia de tráfico en G2-Vilanova provocan estas discrepancias.

Las otras dos correlaciones mostradas, entre B2-Louseiras y las estaciones C9-Mourence y B1-A Magdalena, mucho menores, ponen de relieve las notables diferencias entre ambos tipos

de estación (rural de fondo frente a suburbanas de tráfico). Sin embargo, debe destacarse el hecho de que en algunos episodios (julio 2005, junio 2006, julio 2006(2), septiembre 2006(1), etc.) mantienen unos niveles de correlación altos, y muy próximos a los de las anteriores parejas relacionadas, lo cual podría ser indicativo de una elevación generalizada de los niveles de ozono, que enmascara las influencias locales de cada estación, debido por ejemplo a un mecanismo de importante transporte regional.

### 3.4 Situación general del ozono troposférico en el noroeste peninsular.

Este apartado describe los niveles de concentración de ozono en el noroeste de Galicia, mediante el análisis de su evolución espacial y temporal en el período 2002-2007. Se estudia la variabilidad diaria, mensual, estacional y anual de los registros de ozono recogidos en cinco estaciones de la Red Gallega de Calidad del Aire y en las tres estaciones EMEP más próximas al noroeste gallego.

#### 3.4.1 Cobertura de datos

Se presenta a continuación el porcentaje de registros válidos de inmisión de ozono troposférico en las estaciones de monitorización empleadas para la elaboración de la estadística descriptiva que incluye este apartado. El porcentaje de datos válidos ha sido calculado en función de las medias horarias de inmisión, y se muestra en la tabla 3.6.

Estación	Porcentaje de recuperación de datos horarios					
	2002	2003	2004	2005	2006	2007 <sup>(*)</sup>
B1-A Magdalena	47.9	99.1	95.0	92.7	98.1	97.3
B2-Louseiras	94.7	96.5	95.1	96.7	98.5	99.5
C9-Mourence	96.4	98.8	99.4	98.3	98.8	99.0
F2-Fraga Redonda	95.7	98.7	94.6	96.1	98.7	96.6
G2-Vilanova	50.2	99.4	98.3	99.2	98.7	97.2
O Saviñao	97.7	95.9	97.6	97.9	96.6	96.3
Niembro	97.5	92.2	97.5	97.6	98.5	99.0
Peñausende	93.3	92.4	97.7	96.7	97.1	98.1

(\*) El año 2007 sólo incluye los ocho primeros meses

Tabla 3.6: Cobertura temporal de medidas horarias de inmisión de ozono por estación y año, expresada como porcentaje anual de datos válidos empleados en los cálculos. El año 2007 incluye sólo el período de Enero a Agosto, estando calculado el porcentaje sobre esos ocho meses.

Las estadísticas de datos validados y recuperados son óptimas en la mayoría de las estaciones, superiores en general al 95%, aunque destacan dos puntos que requieren un comentario adicional:

- Las estaciones B1-A Magdalena y G2-Vilanova presentan un porcentaje bajo, en torno al 50%, durante el año 2001, debido a que la puesta en funcionamiento de la instrumentación de medida de ozono comenzó en el mes de Julio de 2001
- El porcentaje de datos válidos del año 2007 se refiere únicamente al período de Enero a Agosto (ocho meses), de modo que los datos de este año no se han utilizado en algunos casos, como en el cálculo de las medias anuales, dada su falta de representatividad

En el caso de las estaciones de la U.P.T. Endesa-As Pontes hay que tener en cuenta que su Red de Vigilancia Atmosférica está avalada por la certificación internacional ISO 9001, lo cual

garantiza que el elevado porcentaje de datos disponibles cumple con los estándares de calidad objetivos establecidos por dicha norma.

Se ha descartado la inclusión de otras estaciones de la Red Gallega de Calidad de Aire en este estudio general sobre la evolución temporal del ozono en Galicia debido a su menor cobertura temporal de datos o a no disponer de una serie de datos anuales suficientemente larga, como en el caso de las estaciones de San Vicente de Vigo y Marín-Escuela Naval.

### 3.4.2 Variabilidad interanual y estacional del ozono troposférico.

Se ha analizado una serie temporal de cinco años de datos horarios de ozono recogidos en el noroeste de Galicia (noroeste de la península Ibérica) entre los años 2002 y 2006. Se han utilizado cinco estaciones en ese área, y las tres estaciones EMEP más próximas a la zona de estudio, a efectos comparativos, recogidas en las tablas 3.0 y 3.1 y descritas en el apartado anterior.

Se han promediado en cada estación la media diaria y los máximos diarios para cada año y mes. La variabilidad interanual se ha estudiado mediante los percentiles 50 y 98, como representativos de los valores medios y máximos.

#### Variabilidad interanual

El valor medio anual para el lustro analizado oscila entre los  $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de C9-Mourence y los  $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de B2-Louseiras, entre las estaciones del noroeste de Galicia, siempre por debajo de los  $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$  registrados en Peñausende (figura 3.19). Las estaciones rurales F2-Fraga Redonda, G2-Vilanova, Niembro y O Saviñao presentan todos valores medios muy semejantes, en torno a  $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ligeramente mayores que las estaciones suburbanas B1-A Magdalena y C9-Mourence, con  $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media. Las medias anuales durante cinco años de los valores máximos diarios oscilan en Galicia entre los  $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de G2-Vilanova y los  $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$  registrados en B2-Louseiras, siempre inferiores a la media de  $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en Peñausende (figura 3.20).

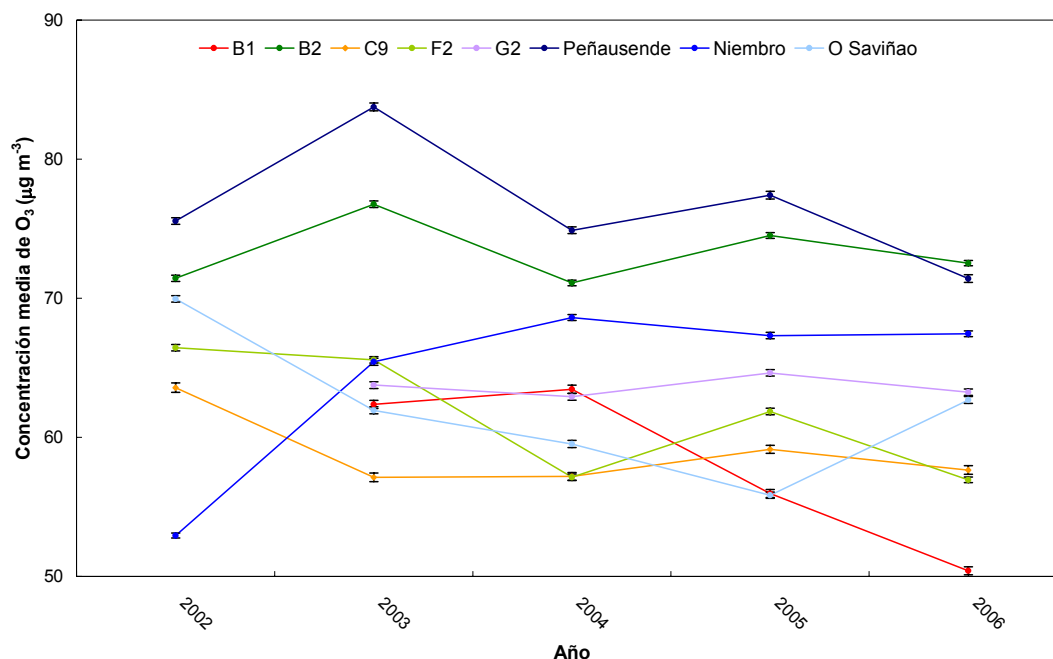


Figura 3.19: "Series de concentración media anual y error típico asociado para ozono troposférico durante el período 2002-2006 en las estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio"

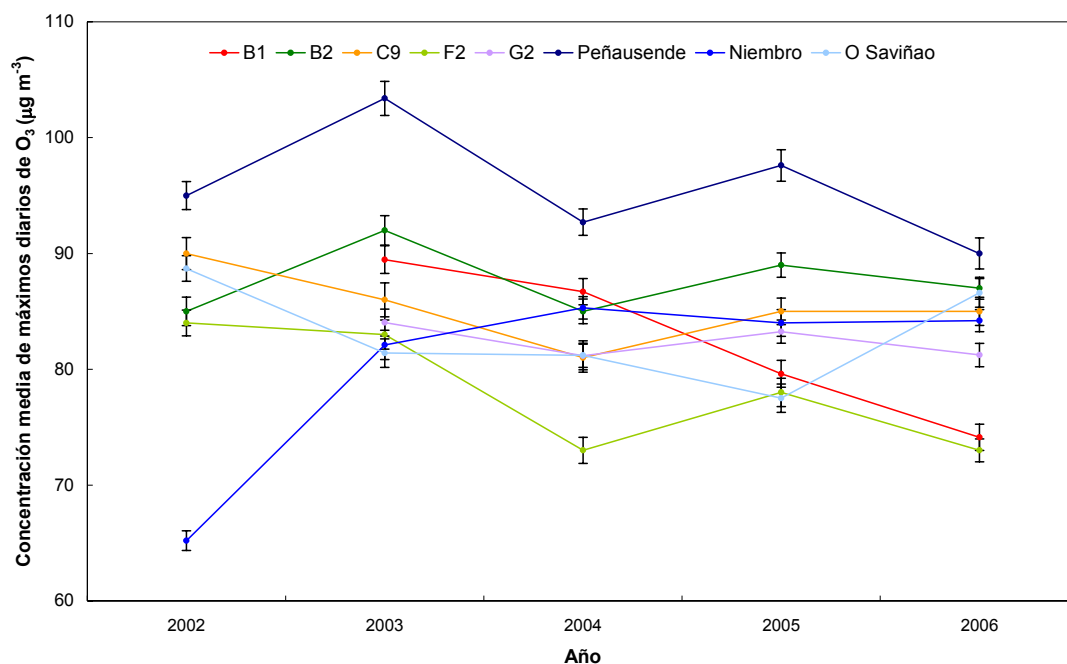


Figura 3.20: “Series de concentración media anual de los máximos diarios y error típico asociado para ozono troposférico durante el período 2002-2006 en las estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio”

Aunque la serie temporal no es suficientemente larga para extraer conclusiones definitivas, las tendencias de la media anual de concentraciones diarias y de máximos diarios son coincidentes, y muestran un mantenimiento general de los valores de inmisión durante todo el período en las estaciones rurales, sin variaciones significativas de la media anual, salvo un aumento puntual en algunas estaciones durante el año 2003, causado por las emisiones procedentes de los incendios en la península Ibérica y la ola de calor que afectó a toda Europa durante ese verano (Solberg et al., 2005; Fiala et al., 2003). Las dos estaciones suburbanas presentan comportamientos diferentes, con una bajada significativa en B1-A Magdalena en los últimos tres años y valores constantes en C9-Mourencia. Trabajos previos sobre el mismo dominio indican que estos datos registrados en las estaciones de la Red Gallega de Calidad de Aire son muy semejantes a los de años precedentes, confirmando la no existencia de tendencias significativas en la media anual: Peña y colaboradores (Peña et al., 2000) indican medias anuales de  $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda entre los meses de Abril de 1994 y Septiembre de 1995, frente a los  $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$  derivados de este estudio entre los años 2002 y 2006. Otros trabajos realizados en zonas costeras próximas indican valores en el mismo rango, como los  $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación EMEP de Noia en el período 1993-1994 (Gimeno et al., 1999b).

La altitud de la estación de Peñausende explica los mayores valores medios y de máximos registrados en ella, al estar en contacto con estratos atmosféricos por encima de la inversión térmica superficial, con lo cual los procesos de deposición seca y de eliminación por reacciones químicas (destrucción por óxido nítrico NO emitido en superficie) son mucho menos eficientes, además de incrementarse la radiación fotoquímica incidente (Coyle et al., 2002; Chevalier et al., 2007; Sánchez et al., 2005; Ribas y Peñuelas, 2006). Las elevadas medias registradas en B2-Louseiras también parecen estar relacionadas con su mayor altitud con respecto al resto de estaciones, lo cual, unido a su situación próxima a la costa, favorece el mantenimiento de altos niveles de ozono durante largos períodos, aumentando así su media anual por encima de la de otras estaciones próximas, con valores máximos cercanos.

Un claro ejemplo de los efectos combinados de la menor deposición de ozono sobre las zonas costeras y la limitada inmisión de óxidos de nitrógeno, dado su carácter costero y rural, es la estación de Niembro: esta estación se encuentra entre las que poseen una media anual más elevada, pero en la media anual de máximos diarios pasa a ocupar una posición media-baja. El comportamiento opuesto puede observarse en la estación de O Saviñao, dada su localización en el interior.

Dentro de las estaciones de la zona de estudio, la estación más próxima a la costa, G2-Vilanova, representa un caso similar al de Niembro, siendo menos claro en estaciones situadas a media distancia del mar, como B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda. Sin embargo, las estaciones suburbanas B1-A Magdalena y C9-Mourence, situadas en el interior, muestran de nuevo valores medios anuales inferiores a los registrados en las estaciones rurales, mientras sus medias anuales de máximos son, en general, superiores –salvo en B2-Louseiras, situada a mayor altitud–; esta situación obedece al citado mecanismo local de eliminación nocturna del ozono debido a la mayor concentración de NO procedente sobre todo de emisiones de tráfico, que origina mínimos bastante inferiores en las áreas urbanas y suburbanas, combinado con la menor deposición seca en lugares próximos al mar (Entwistle et al., 1997; Scheel et al., 1997; Ribas y Peñuelas, 2004).

El estudio de la variación interanual en las estaciones seleccionadas se ha realizado mediante el cálculo de los percentiles 50 y 98 (figuras 3.21 y 3.22). En general se acepta que los niveles de ozono en el medio de la distribución de frecuencias (por ejemplo, el percentil 50) muestran una menor sensibilidad a los cambios en las emisiones que los valores situados en la parte superior de la distribución, como el percentil 98.

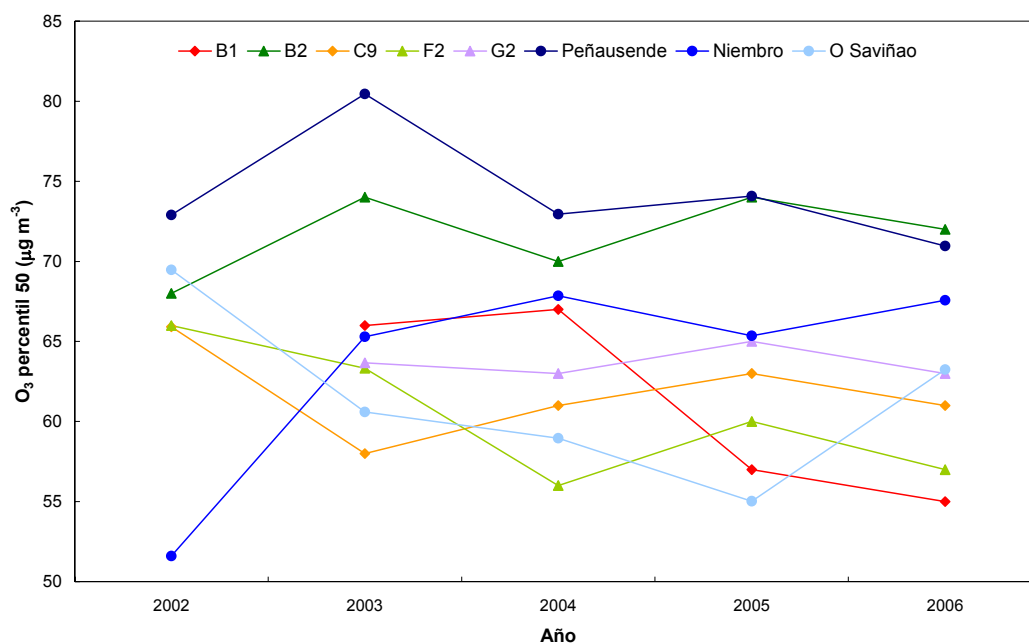


Figura 3.21: “Variación interanual representada por el percentil 50 de las concentraciones de ozono troposférico durante el período 2002-2006 en las estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio”



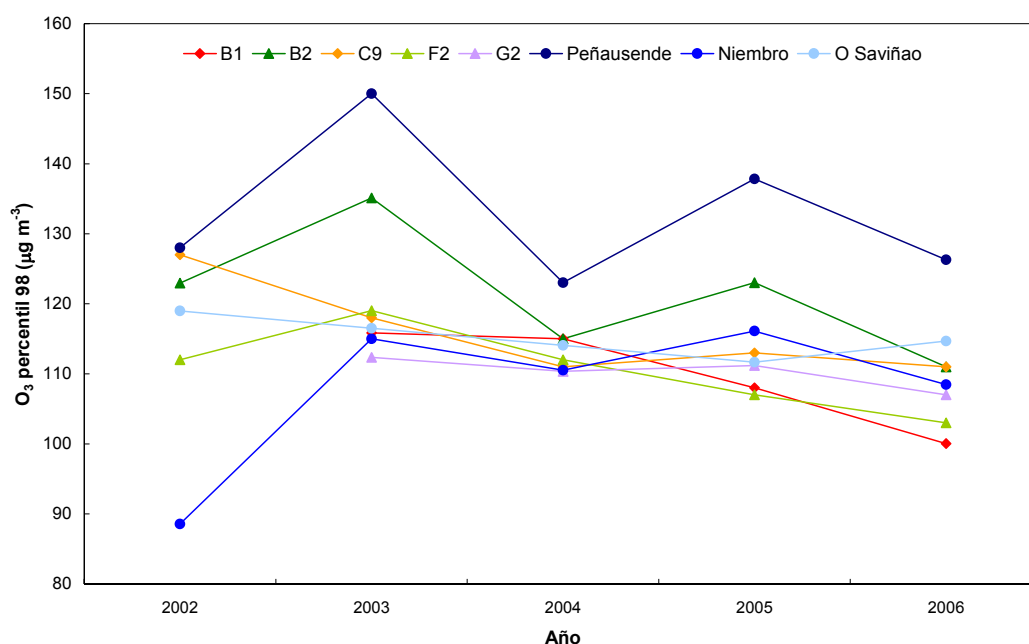


Figura 3.22: “Variación interanual representada por el percentil 98 de las concentraciones de ozono troposférico durante el período 2002-2006 en las estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio”

El análisis de tendencias en estas series temporales de los percentiles se ha basado en la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Gilbert, 1987), especialmente útil cuando los datos no obedecen a ninguna distribución particular y las series no están completas. Los resultados obtenidos indican descensos estadísticamente no significativos en el percentil 50 para todas las estaciones, salvo B2-Louseiras y Niembro, que muestran leves aumentos. Existen ligeras diferencias para el percentil 98, con una bajada significativa en la estación B1-A Magdalena y disminuciones sin relevancia estadística en el resto de estaciones, salvo Niembro, con un pequeño aumento del citado percentil 98. Estos resultados son coherentes con las medias anuales analizadas previamente, pero apuntan a una cierta tendencia a la disminución de los niveles de ozono, sobre todo en los valores del percentil 98. Sin embargo, los análisis de tendencias a nivel global en Europa para los últimos quince años aportan resultados algo diferentes, con valores estables o en ligero aumento para las series del percentil 50, sobre todo durante el invierno, y descensos significativos en el percentil 98 (De Leeuw, 2000; Norwegian Institute for Air Research, 2005), sobre todo en el centro y norte de Europa. Estos cambios en los valores extremos (picos episódicos representados por el percentil 98) se relacionan de forma inequívoca con el descenso en la emisión de precursores del ozono troposférico (Derwent et al., 2003; Solberg et al., 2005b), mientras el aumento de los percentiles más bajos se asocia con la reducción invernal del mecanismo de limpieza a través de la reacción  $\text{NO} + \text{O}_3$ , debido a la citada reducción de emisiones, y con un aumento de los niveles de ozono de fondo (Simmonds et al., 2004; Solberg, 2003; Jonson et al., 2006), aunque esta tendencia del ozono base parece haberse detenido o invertido ligeramente a partir del año 2000 (Derwent et al., 2007).

A diferencia de la mayoría de países europeos, esta reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno no se ha producido todavía en la península Ibérica, manteniéndose por el contrario aumentos del 19% para España y 5% para Portugal en dichas emisiones entre 1990 y 2006, aunque sí se ha logrado una disminución del 10-12% en España y del 3% en Portugal en los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM) durante ese mismo período, según datos del Inventario Nacional de Emisiones a la Atmósfera (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009) y del Inventario Europeo de Emisiones (European Environment Agency, 2008b). Esta podría ser una de las causas que retrasen el incremento de las medias

anuales y de los percentiles inferiores, como ocurre en el norte de Europa, al mantenerse la limpieza de ozono superficial mediante NO. Sin embargo, la disminución de los valores de pico, aunque sin relevancia estadística, no puede ser achacable a una inexistente reducción de emisiones en la península Ibérica, así que puede tratarse de un efecto causado por la variabilidad meteorológica interanual, al considerar series temporales de sólo cinco años, o bien por la reducción de emisiones en los países limítrofes (Tarrasón et al., 2003). Aún así, se trata de un interesante fenómeno del que debería realizarse un seguimiento en el futuro, sin que por ahora se puedan establecer conclusiones debido a que la serie de valores anuales (2002-2006) es demasiado corta, y más aún si se tiene en cuenta que en los próximos años tampoco se espera ninguna importante caída en las emisiones de óxidos de nitrógeno.

#### Variabilidad mensual

El ciclo anual de los niveles de ozono troposférico en el Hemisferio Norte es un fenómeno ampliamente estudiado, y presenta pronunciados ciclos estacionales, con diferentes patrones en función de la altitud y la latitud (Scheel et al., 1997; Monks, 2000; Vingarzan, 2004). Estos ciclos son controlados por varios procesos, entre los cuales destacan la formación fotoquímica, la deposición y el transporte (horizontal y vertical), actuando a escala local, regional y global. En Europa, las observaciones muestran un claro patrón geográfico, con un máximo estival que domina en las regiones mediterráneas y Europa Central, y se desplaza a la primavera en las costas atlánticas del norte y el oeste de Europa, estableciéndose un gradiente latitudinal noroeste-sureste en el desplazamiento de este máximo (Scheel et al., 1997; Derwent et al., 2004). La existencia del máximo estival de larga duración se relaciona con la producción fotoquímica de ozono, siendo característico de regiones continentales afectadas por contaminación de origen fotoquímico (Derwent y Davies, 1994), mientras que el máximo primaveral es un fenómeno típico del Hemisferio Norte (Simmonds et al., 1997), sobre cuyo origen se ha debatido intensamente en los últimos años (Monks, 2000); inicialmente este máximo primaveral se atribuyó a las intrusiones de ozono estratosférico, debidas a la variación anual del intercambio troposfera - estratosfera (Logan, 1985), pero las explicaciones más recientes abogan por una mayor influencia del origen troposférico, debido a la producción fotoquímica a partir de la acumulación invernal de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos (Liu et al., 1987), o bien al transporte intercontinental de masas de aire contaminadas (Wang et al., 1998; Penkett et al., 2004; Derwent et al., 2004).

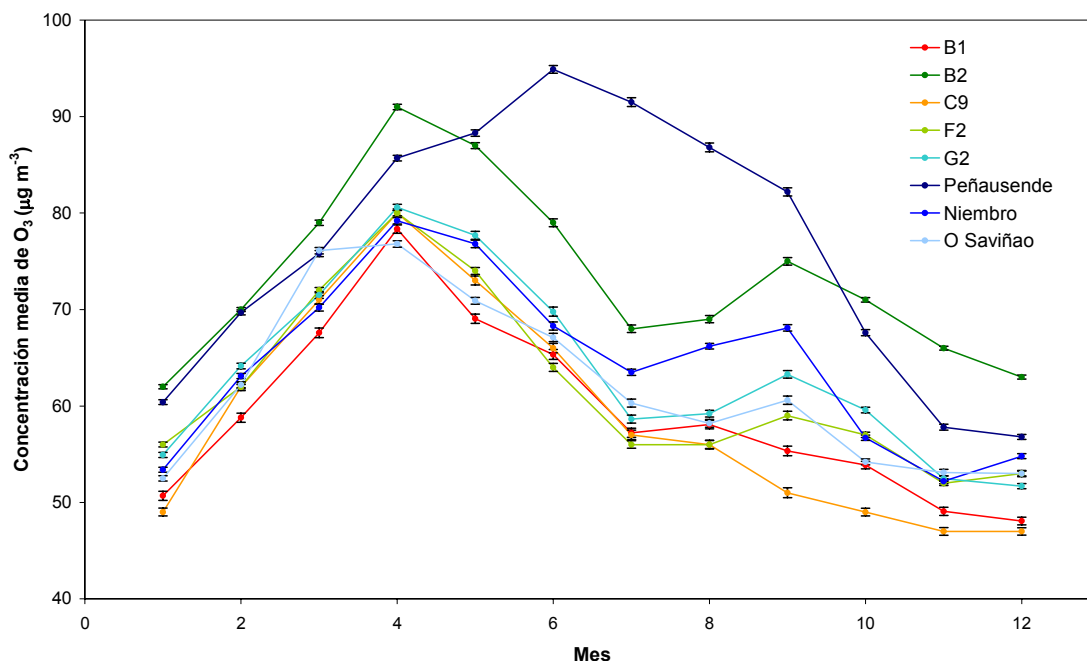


Figura 3.23: "Series de concentración media mensual y error típico asociado para ozono troposférico durante el período 2002-2006 en las estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio"

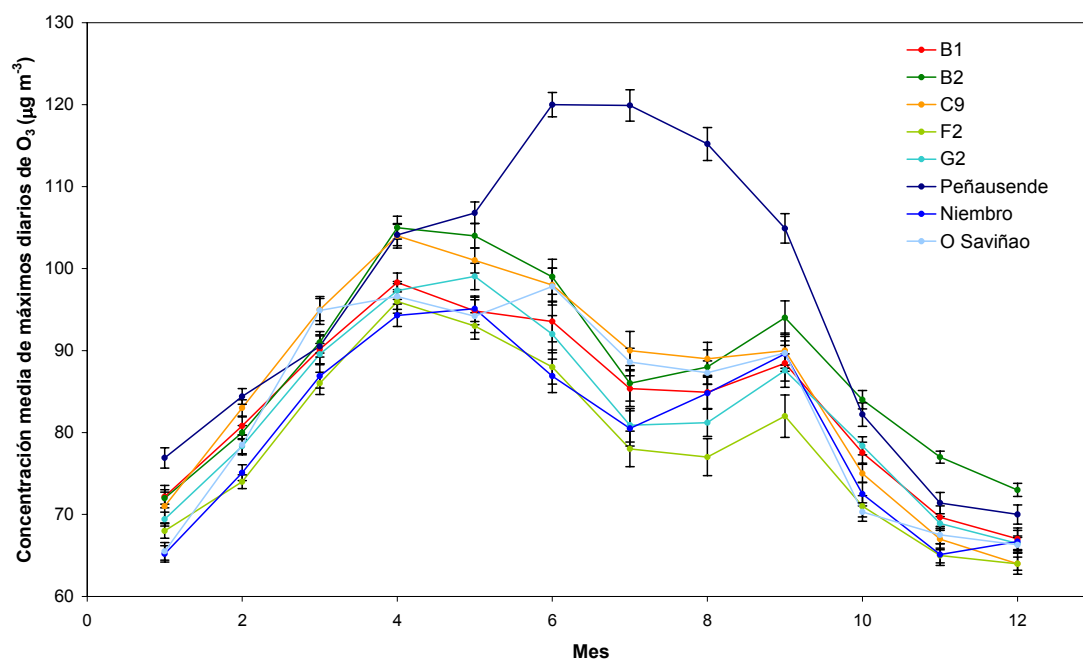


Figura 3.24: "Series de concentración media mensual de los máximos diarios y error típico asociado para ozono troposférico durante el período 2002-2006 en las estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio"

Las figuras 3.23 y 3.24 muestran los resultados de la media diaria mensual y de la media mensual de los máximos diarios. Las cinco estaciones de la Red Gallega de Calidad del Aire, junto con las estaciones EMEP de O Saviñao y Niembro, presentan el perfil típico de las estaciones de latitudes medias del Hemisferio Norte, poco afectadas por contaminación atmosférica, con un máximo primaveral en el mes de Abril, un mínimo estival en Julio, y otro mínimo invernal entre Noviembre y Enero. Estas estaciones muestran un ciclo estacional muy semejante a las estaciones situadas en el norte de Europa o en la costa occidental que se presentan en la figura 3.25a-b, destacando su parecido con el perfil de la estación de referencia Mace Head (MHD en la figura 3.25a), situada en la costa irlandesa. La estación EMEP de Peñausende presenta otro tipo de comportamiento, más propio de zonas elevadas o incluso de áreas continentales afectadas por contaminación antropogénica, con permanencia de valores elevados durante el verano, un máximo estival en Junio, y lenta disminución hasta el mínimo invernal (Scheel et al., 1997). Su ciclo estacional se asemeja a los que presentan las estaciones en altitud (figura 3.25c), menos afectadas por procesos superficiales, y que miden el ozono presente en la parte inferior de la troposfera libre, o bien en la frontera superior de la capa límite planetaria, pues su altitud alcanza los 987 m. A pesar de su menor amplitud, los ciclos estacionales en las estaciones situadas en altitud son comparables a los que presentan estaciones geográficamente próximas, pero en cotas inferiores, que registran el ozono dentro de la capa límite atmosférica.

A pesar de este comportamiento general común en las estaciones del noroeste de Galicia, existen ciertas diferencias entre ellas, pues ambas estaciones rurales con influencia de fondo (B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda) registran un mínimo absoluto invernal muy semejante al mínimo estival, a diferencia de las estaciones suburbanas (B1-A Magdalena y C9-Mourencia), con un retroceso mucho más acusado de los niveles de ozono durante los meses de invierno (debido a su mayor consumo de ozono por NO, por la influencia de emisiones locales, dado su carácter suburbano) y máximo estival de menor importancia. La estación de O Saviñao registra un perfil semejante al de las estaciones gallegas de tipo rural, pero con un máximo secundario estival menos marcado o casi inexistente, mientras la estación asturiana de Niembro sí muestra un claro máximo secundario en verano, más en consonancia con el resto de estaciones costeras.

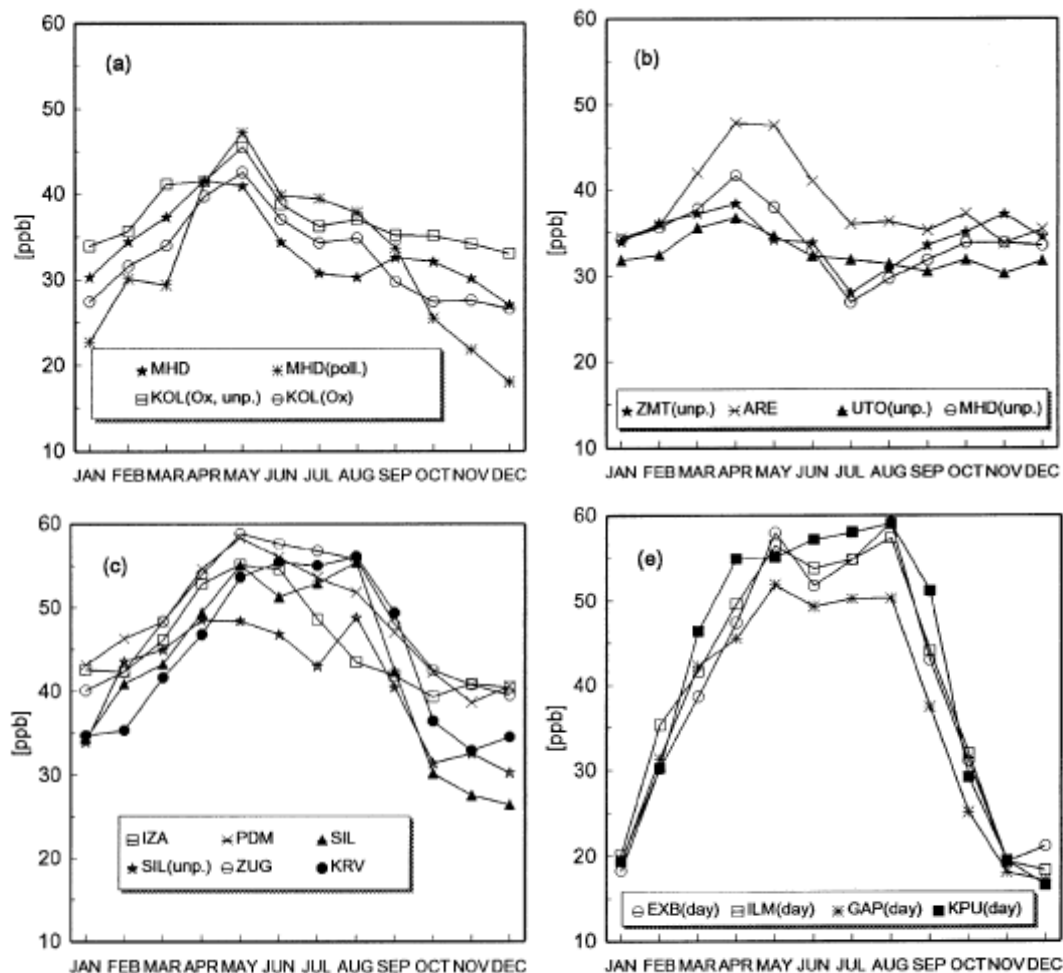


Figura 3.25: “Series de variaciones mensuales de la concentración de ozono troposférico durante el período 1989-1993 para estaciones europeas situadas en la costa occidental o el norte de Europa (a, b) estaciones situadas en montañas o áreas de gran altitud (c) y estaciones situadas dentro de la capa límite atmosférica en el centro del continente (e), más afectadas por la contaminación fotoquímica. Las siglas ‘unp’ y ‘pol’ hacen referencia a ‘unpolluted air’ y ‘polluted air’, respectivamente, mientras las siglas ‘Ox’ se refieren a que se ha considerado la concentración de  $O_x$  ( $O_3 + NO_2$ ) en lugar de  $O_3$ . Adaptado de Scheel et al., 1997”

La variación estacional registrada en las estaciones de la Red Gallega de Calidad del Aire, además de las estaciones EMEP de Niembro y O Saviñao se corresponde con el modelo citado para las costas atlánticas europeas, con un máximo primaveral absoluto y un máximo estival secundario. Existen ligeras diferencias entre las estaciones rurales más occidentales (B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda) y las más orientales (Niembro y O Saviñao), pues las primeras están más próximas a un mínimo absoluto estival, en consonancia con estaciones situadas en la costa oeste de Irlanda y Escandinavia (Scheel et al., 1997; Linskog y Kindbom, 2001). La estación EMEP de Peñausende presenta un patrón diferente, relacionado con su notable cota altitudinal y su nula afectación marina.

El ciclo anual registrado durante el período 2002-2007 en las estaciones rurales de fondo del noroeste gallego (B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda) muestra bastantes similitudes con el observado (para masas de aire oceánico) durante los años 1989-1993 en la estación de referencia Mace Head, en la costa oeste de Irlanda, con gran presencia en la bibliografía sobre tendencias temporales del ozono troposférico (Derwent et al., 1998, 2004, 2007; Carslaw, 2005; Simmonds et al., 2004; Scheel et al., 1997). Esta semejanza, unida a la situación similar de la estación de Mace Head y las estaciones gallegas B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda en el

borde atlántico europeo, podría permitir la extrapolación de algunas conclusiones sobre las tendencias seguidas por la estación irlandesa a las estaciones del noroeste gallego.

Existen evidencias de mantenimiento o cierta declinación de los niveles de ozono de fondo en Mace Head a partir del año 2000 (Derwent et al., 2007), algo que también se ha observado en las estaciones objeto de este estudio. Los niveles de ozono de fondo en Mace Head presenta una elevada contribución del transporte intercontinental de masas de aire procedente de Norteamérica y Asia, como ocurre en el oeste peninsular (García et al., 2005), así como de ozono procedente del intercambio troposfera-estratosfera, siendo menor la influencia de las masas europeas. Un efecto semejante, aunque modulado por su situación geográfica, más ligada a la Europa continental, afecta a las costas gallegas, de modo que los niveles de ozono de fondo en esta región presentan una gran influencia de las fuentes norteamericanas y asiáticas, como indican algunos estudios (Derwent et al., 2004), estando por ello menos afectadas por la reducción de emisiones en la Europa continental.

Sin embargo, estudios previos realizados en las citadas estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda durante el trienio 1993-1995 muestran un ciclo anual ligeramente diferente, dominado por un máximo estival absoluto, aunque se mantiene el máximo primaveral secundario en el mes de Abril (Peña et al., 2000), pero de menor intensidad que en el período 2002-2006. Resultados semejantes son hallados por Gimeno y colaboradores (Gimeno et al., 1999b) durante el bienio 1993-1994 en la estación EMEP de Noia, situada también en el oeste de la costa gallega, mostrando un amplio máximo absoluto estival, y un máximo primaveral secundario, pero cercano. Estos datos, aunque insuficientes, parecen apuntar a un desplazamiento del máximo estacional desde el verano hacia la primavera, debido al reforzamiento de las concentraciones primaverales y al debilitamiento de las estivales. Estas observaciones concuerdan con los análisis de Carslaw (Carslaw, 2005) en Mace Head, según los cuales el ciclo anual de ozono tiende a estar controlado en los últimos años por el ozono de fondo, más que por la producción fotoquímica de ozono: las masas de aire libre de contaminación (masas de aire oceánico con ozono de fondo) están experimentando un aumento de la amplitud estacional (con máximo en Abril y mínimo en Julio), mientras las masas de aire contaminado (producción fotoquímica de ozono, de origen europeo), con valores máximos de ozono en verano, han sufrido una reducción de su amplitud estacional. Las causas de estas variaciones se atribuyen al aumento en las emisiones de  $\text{NO}_x$  en América y Asia, afectando al contenido en ozono de las masas oceánicas transportadas, y a la reducción en las emisiones europeas de precursores de contaminación fotoquímica, que modifica las concentraciones de ozono en las masas de aire contaminado, de modo que éstas tiende a asemejarse cada vez más a las de las masas oceánicas. Es necesario realizar un estudio detallado de las tendencias de ozono a partir de series temporales suficientemente largas en el noroeste de la península Ibérica para confirmar estas hipótesis, aunque los primeros indicios apoyan las conclusiones anteriores, y explican las similitudes reseñadas en el ciclo anual de ozono entre la estación irlandesa de Mace Head a principios de los años 90 y las estaciones del noroeste gallego a principios del siglo XXI.

La distribución mensual de los valores máximos diarios de ozono (figura 3.24) muestra un comportamiento similar a la distribución de valores medios diarios de ozono, pero refleja la contaminación local en las estaciones con mayor influencia antropogénica en su atmósfera, como B1-A Magdalena y C9-Mourence, ya que ambas estaciones pasan a ocupar una posición cabecera al considerar los niveles máximos diarios, en los que no influye la destrucción “in situ” de ozono mediante NO durante la noche. Este cambio es más notorio en los meses de invierno (Noviembre - Febrero), a causa de la menor radiación solar disponible, pero también se observa en la época estival, con una disminución de los valores máximos estivales bastante menos acusada con respecto a los máximos primaverales (común a todas las estaciones, pero más evidente en las urbanas), e incluso un desplazamiento de los mismos hacia el verano, como en la estación EMEP de O Saviñao.

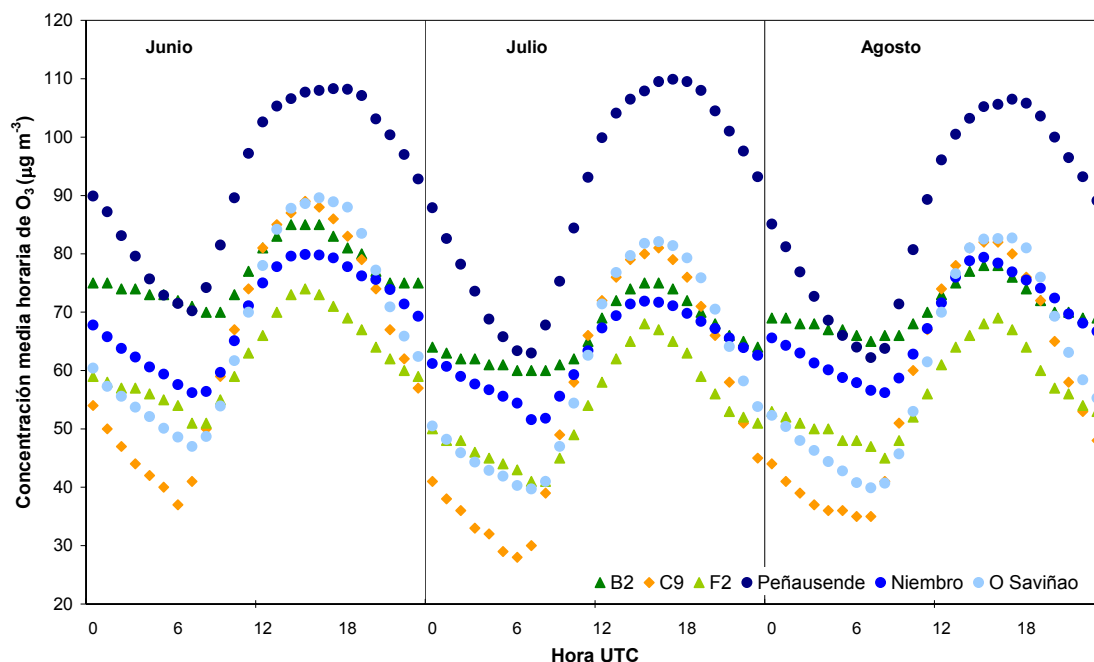


Figura 3.26: “Series de concentración media horaria de ozono troposférico en los meses de verano (Junio-Agosto) durante el período 2002-2006 en estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio”

### 3.4.3 Variabilidad diaria del ozono troposférico.

La variación diaria de ozono proporciona información sobre la interacción de las emisiones y los procesos físico-químicos que operan durante el ciclo diurno. Los niveles de ozono tienden a seguir la variación de intensidad de la radiación solar, generando concentraciones más elevadas durante el período de luz diurna. Durante estos ciclos diarios, el incremento en los niveles de ozono diurnos se atribuye a los efectos combinados de la producción fotoquímica de ozono en la capa de mezcla y al transporte desde capas superiores (United States Environmental Protection Agency, 2006), lo cual se encuentra favorecido al mediodía por la actividad convectiva en la capa límite continental. Ambos mecanismos se activan debido a la radiación solar. Por el contrario, los niveles nocturnos se atribuyen a la eliminación “in-situ” de ozono por la conocida reacción entre  $O_3$  y  $NO$ , y a la deposición seca sobre el suelo y la vegetación.

Los meses de verano representan el grupo de mayor interés en el estudio del comportamiento del ozono con origen fotoquímico (Xu et al., 1996; Danalatos y Glavas, 1996), causante de la mayoría de los episodios de ozono, debido a las favorables condiciones meteorológicas dominantes en esta estación, tales como la intensa radiación solar que provoca el comienzo de las reacciones químicas con los precursores, y la escasa dispersión atmosférica, que favorece la acumulación de ozono en estratos próximos al suelo. De acuerdo con ello, se han analizado los ciclos diarios de ozono durante el período de Junio a Agosto, utilizando la mencionada serie temporal de cinco años de datos horarios entre los años 2002 y 2006, según se muestra en la figura 3.26.

El análisis de los ciclos diarios en las estaciones seleccionadas durante el verano permite distinguir tres tipos diferentes de patrones:

- Valor mínimo muy pronunciado que aparece en las primeras horas de la mañana (7 UTC) y, a partir de ahí, comienza a incrementarse de forma rápida, asociado a los procesos de ruptura de la capa de inversión nocturna y a las reacciones con óxidos de nitrógeno. Hacia el mediodía (13-14 UTC) la tasa de aumento se reduce significativamente, pero el ascenso se mantiene hasta alcanzar el valor máximo a media tarde (16-17 UTC), comenzando un

descenso continuo y rápido hasta el mínimo reseñado. Este patrón con oscilaciones muy marcadas es típico de las estaciones EMEP de Peñausende y O Saviñao, aunque en esta última el descenso nocturno es ligeramente menos acusado.

- b) Valor mínimo muy pronunciado en las primeras horas de la mañana (6 UTC), con rápido ascenso posterior hasta alcanzar un máximo puntual a primera hora de la tarde (15-16 UTC), descendiendo posteriormente hasta marcar el mínimo citado. Se trata de nuevo de un ciclo con oscilaciones muy notorias, que caracteriza a las dos estaciones suburbanas de la Red Gallega de Calidad de Aire, B1-A Magdalena y C9-Mourence. El ciclo es más acusado en la estación C9-Mourence, probablemente debido a la contaminación antropogénica más intensa, como indican la mayor intensidad de los mínimos nocturnos, y a la localización más continental, que favorece el desarrollo de la capa estable nocturna, facilitando así la eliminación de ozono.
- c) Concentración mínima poco marcada entre las 6 UTC y las 8 UTC, alcanzada tras un suave descenso durante el período nocturno. El máximo se observa entre las 14 UTC y las 16 UTC, para descender a continuación de forma rápida hasta las 22 UTC, momento en el cual esta disminución se ralentiza, experimentando una bajada muy suave durante la noche, con valores casi constantes, hasta marcar el citado nivel mínimo. Es un ciclo muy poco marcado, con una suave oscilación, caracterizado por el mantenimiento de elevados valores nocturnos bastante constantes, típico de las estaciones B2-Louseiras, sobre todo, y Niembro. Un patrón muy similar, pero con oscilaciones ligeramente más intensas, se produce en F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova, pudiéndose considerar intermedio entre la oscilación intensa de las estaciones suburbanas y la reducida de las estaciones rurales B2-Louseiras y Niembro.

Las características de estos patrones temporales son específicas de la localización y del contaminante (ozono y precursores, en este caso), y vienen determinadas por la compleja interacción existente entre emisión de precursores, química, procesos de deposición y condiciones meteorológicas que condicionan la dispersión.

El ciclo diurno de ozono en las zonas rurales está dirigido por la producción fotoquímica y los cambios en la capa límite planetaria y la troposfera libre. Durante el día, la mezcla turbulenta en la capa límite, originada por la cizalla del viento y la convención térmica, provoca la entrada de ozono desde la troposfera libre (Stull, 1988). Durante el verano, con tiempo soleado, la presencia de emisiones de  $\text{NO}_x$  y COVs contribuyen a la producción fotoquímica en la troposfera, incrementando las concentraciones de ozono. Estos procesos provocan un pico en la concentración de ozono a partir del mediodía, cuando la turbulencia atmosférica es mayor y los niveles de radiación ultravioleta-visible alcanzan el máximo. Durante la noche y las primeras horas de la mañana, se produce la estratificación térmica y aumenta la estabilidad en la parte inferior de la capa límite, a medida que la superficie se enfría, limitando notablemente la entrada de ozono desde la troposfera libre. La concentración de ozono decrece rápidamente debido a las pérdidas por deposición, que no son compensadas por la mezcla desde arriba ni por la inexistente formación fotoquímica, alcanzándose la concentración mínima entre la medianoche y el amanecer.

El grado de estabilización y aislamiento de la capa límite nocturna con respecto al resto de la troposfera depende de la topografía local y la meteorología. Las zonas bajas experimentan una mayor destrucción de ozono durante la noche, porque la intensidad de viento se reduce en este período, y el enfriamiento nocturno produce una capa límite muy estable, coronada por una inversión térmica. Por el contrario, en zonas elevadas, como la cima de montes, la reducción del ozono nocturno es menor: aunque las capas bajas de la atmósfera se enfrían, la turbulencia se mantiene, ya que el aire frío fluye pendiente abajo y es reemplazado desde arriba por masas de aire relativamente enriquecidas en ozono. En zonas costeras, el ciclo diurno es semejante debido a las brisas marinas que mantienen la mezcla y causan la advección hacia el interior de aire marino con altos niveles de ozono, además de existir una menor limpieza de ozono. Por tanto, el grado de reducción del nivel de ozono nocturno desciende claramente con la altitud, aunque la magnitud y el horario de los picos diurnos sea semejante en toda el área, indicando que las concentraciones rurales son generalmente comparables en una amplia área geográfica durante el día. Existen abundantes demostraciones de estas variaciones altitudinales en el ciclo

diurno en la literatura científica, como Coyle y colaboradores (Coyle et al., 2002) en las Islas Británicas, Sanz (Sanz et al., 1999) y Millán (Millán et al., 2000) en la península Ibérica, etc.

En este caso, las estaciones costeras muestran diferencias mucho menos acusadas entre el día y la noche, siendo una de las razones los vientos de mayor intensidad que se registran en estas áreas, que alteran la estabilidad vertical (Ribas y Peñuelas, 2004; PORC, 1997), de modo que favorecen la mezcla de ozono y reducen su destrucción; otro posible factor a tener en cuenta es que la deposición de ozono sobre zonas costeras es más lenta, si no hay gran disponibilidad de  $\text{NO}_x$  en la atmósfera (Entwistle et al., 1997), con lo cual la combinación de ambos factores aumenta los niveles nocturnos. Dentro de las estaciones costeras, los niveles nocturnos en la estación B2-Louseiras son mucho más elevados que en el resto, probablemente por razones topográficas: debido a su situación en la ladera de un valle, muy próxima a la cumbre del monte, la velocidad de viento es sistemáticamente superior a la del resto de estaciones, aumentando la mezcla en las capas próximas al suelo e impidiendo la deposición nocturna. Otra explicación, de nuevo observada experimentalmente durante el análisis episódico, se debe a la existencia de repuntes nocturnos de ozono, que originan máximos secundarios y mantienen elevados los niveles nocturnos: los cambios en la dirección de los vientos locales de valle, así como el establecimiento del jet nocturno, provocan inestabilidad dinámica en la capa límite estable nocturna, con lo cual penetran en ella masas de aire procedentes de la capa residual superior, más cargada en ozono (Salmond y McKendry, 2002). Una evidencia de este comportamiento es que B2-Louseiras registra máximos diurnos muy semejantes a los observados en estaciones separadas menos de 15 km, como B1-A Magdalena o G2-Vilanova. Obviamente, para que este mantenimiento nocturno tenga lugar no basta con la inestabilidad nocturna, sino que también es necesaria la presencia de ozono en capas superiores.

La forma de los ciclos diarios de ozono, además de por la topografía y la disponibilidad de precursores, está modulada por factores meteorológicos como la intensidad de la radiación solar, necesaria para las reacciones fotoquímicas de formación de ozono, y por la temperatura, clave en las velocidades específicas de reacción y en el establecimiento y desarrollo de la capa de mezcla diurna. El ligero adelantamiento de los máximos diurnos (1-2 horas) observado durante el verano en las estaciones costeras (B2-Louseiras, Niembro, etc.) frente a las situadas más en el interior (C9-Mourence, O Saviñao, Peñausende) obedece, entre otros factores, a la evolución de la temperatura (Dueñas et al., 2002; Acero et al., 2004), más que a la de la radiación solar (máxima sobre la 1 UTC en estas longitudes): en general, durante el verano, la temperatura máxima se alcanza más tarde en zonas del interior, debido al desarrollo de brisas costeras que frenan el ascenso térmico en el litoral.

La figura 3.27 describe la frecuencia horaria de los máximos de ozono troposférico durante el trimestre estival, corroborando los tipos de ciclos diarios de concentración descritos anteriormente: las estaciones costeras (Niembro, especialmente, B2-Louseiras y G2-Vilanova), debido a su régimen térmico más atenuado, y al efecto de vientos locales (vientos de valle y brisas marinas), presentan una mayor proporción de máximos en el período 14-15 UTC, mientras las estaciones interiores, como Peñausende, muestran las tasas mayores de máximos de ozono retrasadas hacia la tarde, entre las 17 UTC y las 18 UTC, existiendo una gradación entre estos dos extremos, donde se situarían estaciones con influencia marina, pero más alejadas del litoral, como F2-Fraga Redonda, B1-A Magdalena, C9-Mourence, y O Saviñao, con proporciones mayores entre las 15 UTC y las 16 UTC.

Las diferencias entre estaciones también se ponen de manifiesto durante el período nocturno, considerado entre 21 UTC y 05 UTC durante los meses de verano. Estaciones como B2-Louseiras y Niembro muestran una proporción significativa de máximos diarios registrados durante este período, con porcentajes superiores al 25 % en el caso de B2-Louseiras, y por encima del 20% en Niembro y F2-Fraga Redonda. Por el contrario, estaciones como C9-Mourence y O Saviñao no superan el 8%. En el caso de B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, su ubicación próxima a la cumbre de un monte y en la ladera alta de un valle, respectivamente, explica al menos parcialmente este comportamiento: la estación B2-Louseiras parece estar en contacto o muy próxima a capas superiores de reserva de ozono residual, como indica la pequeña disminución de las concentraciones nocturnas (figura 3.27), con lo cual una ligera alteración de la estabilidad nocturna, provocada por el flujo descendente de los vientos de



ladera durante la noche, podría causar acusadas elevaciones en los niveles de ozono (Salmond y McKendry, 2002); un proceso similar, aunque de menor intensidad, tendría lugar en F2-Fraga Redonda. El caso de la estación costera de Niembro es semejante, a pesar de encontrarse situada sobre la rasa cantábrica, a escasa altura, debido a la existencia de una cadena de montes paralela a la costa y a unos 3 km de la misma. En este caso, una explicación para los aumentos de ozono podría encontrarse en el arrastre de aire enriquecido en ozono desde zonas interiores, debido a las brisas nocturnas de tierra, amplificadas por los vientos descendentes de valle, y al establecimiento de una capa estable muy débil, o de altura inferior a la altitud topográfica de la estación, por su localización en el borde marino, fácilmente susceptible de alterarse por turbulencia dinámica. Este fenómeno también se repite en la estación de Peñausende, también situada en altura, pero en el interior.

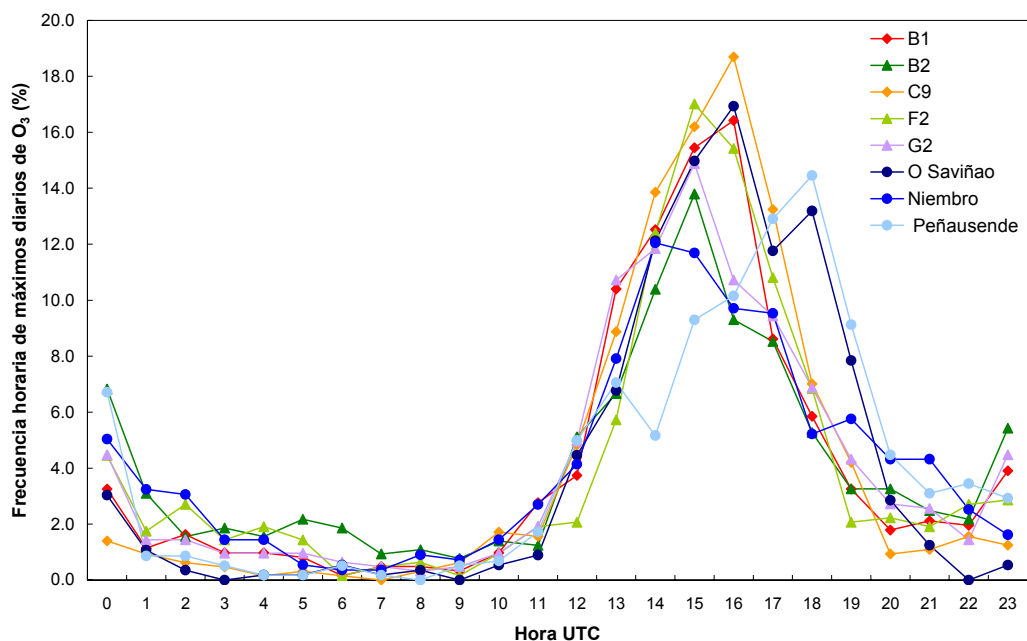


Figura 3.27: “Distribución de frecuencias horarias de los máximos diarios de ozono en los meses de verano (Junio-Agosto) durante el período 2002-2006 en estaciones rurales (▲) y suburbanas (◆) de la Red Gallega de Calidad del Aire del noroeste de Galicia y estaciones rurales de fondo EMEP (●) más próximas al área de estudio”

Estos fenómenos meteorológicos de carácter local, favorecidos por la orografía del terreno, contribuyen a explicar la importante tasa de aparición de máximos nocturnos durante la noche. A su vez, las estaciones de carácter rural, como B2-Louseiras, F2-Fraga Redonda, Niembro y Peñausende, se ven mucho menos afectadas por los mecanismos de eliminación química de ozono, cuya acción se incrementa en áreas urbanas y suburbanas por la mayor emisión de óxidos de nitrógeno; de este modo, el único mecanismo relevante que actúa destruyendo ozono durante la noche es la deposición seca. A pesar de ello, esta explicación no es válida para la estación EMEP de O Saviñao que, a pesar de su carácter rural, apenas presenta máximos diarios durante las noches estivales. Por otro lado, las áreas elevadas como Peñausende y, en menor medida, B2-Louseiras, están desacopladas de los mecanismos de retirada de ozono, ya que la carencia de precursores limita la retirada de ozono por reacción química, dado su carácter local, y la deposición seca se ve reducida por la mayor velocidad de viento. En el caso de la estación de Niembro, su emplazamiento costero provoca que las inversiones nocturnas sean menos frecuentes, de modo que la destrucción de ozono será menos intensa que en zonas del interior (O’Hare y Wilby, 1995).

Los máximos nocturnos, al menos los que se encuentran temporalmente más próximos al anochecer (horas entre las 21UTC y las 00UTC) podrían estar asociados a inyecciones de aire desde capas superiores enriquecidas en ozono, producidas durante las primeras etapas del enfriamiento radiativo y decrecimiento de la capa de mezcla, al mismo tiempo que comienza a

formarse la capa estable nocturna (Sánchez et al., 2007), y suelen estar relacionados con días de menor actividad fotoquímica y con el transporte por vientos de montaña descendentes (Sánchez et al., 2005).

### **3.5 Análisis de episodios**

Este apartado recoge y describe los episodios identificados en el noroeste de Galicia durante el período de estudio Julio 2002 - Agosto 2007, analizando las condiciones sinópticas y meteorológicas características de los mismos, así como su posible origen.

#### **3.5.1 Identificación de episodios**

Los episodios con altos niveles de ozono se seleccionaron de acuerdo con los criterios recogidos en el apartado 3.1 del capítulo 3, es decir:

- Registro de concentraciones horarias de ozono superiores a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Incrementos sensibles de los niveles superficiales de ozono troposférico en períodos temporales muy cortos.

Los datos de inmisión horaria utilizados para el establecimiento de los episodios se midieron en cinco estaciones del noroeste de Galicia, pertenecientes a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. As Pontes (B1, B2, C9, F2 y G2) y descritas en la sección 3.3 de este capítulo, durante el período citado de Julio 2002 a Agosto 2007.

Se han identificado 32 episodios, recogidos en la tabla 3.7, que muestra, para cada episodio, su extensión temporal considerada, la fecha en que se alcanzó el valor máximo de inmisión de ozono troposférico y la estación en la cual se registró el máximo.

Episodio (duración y número)	Fecha/Hora de inmisión máxima	Inmisión máxima de O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Estación
Año 2002			
14-23 Julio (1)	18 Julio - 16 UTC	201	B1
11-17 Agosto (2)	14 Agosto - 16 UTC	142	C9
23-04 Septiembre (3)	02 Septiembre - 16 UTC	157	F2
09-18 Septiembre (4)	14 Septiembre - 14 UTC	136	B1
21-30 Septiembre (5)	27 Septiembre - 17 UTC	145	F2
Año 2003			
16-24 Marzo (6)	21 Marzo - 16 UTC	148	B2
26-01 Junio (7)	29 Mayo - 05 UTC	161	B2
18-24 Junio (8)	20 Junio - 17 UTC	210	B1
06-13 Julio (9)	08 Julio - 15 UTC	139	C9
30-16 Agosto (10)	07 Agosto - 17 UTC	174	C9
12-22 Septiembre (11)	16 Septiembre - 15 UTC	193	G2
Año 2004			
14-22 Mayo (12)	19 Mayo - 15 UTC	170	F2
31-11 Junio (13)	05 Junio - 15 UTC	156	B1
12-19 Junio (14)	17 Junio - 16 UTC	196	B2
28-05 Agosto (15)	01 Agosto - 00 UTC	181	B2
Año 2005			
11-17 Marzo (16)	12 Marzo - 15 UTC	144	F2
27-01 Mayo (17)	30 Abril - 02 UTC	141	B2
22-28 Mayo (18)	26 Mayo - 18 UTC	167	C9
16-25 Junio (19)	22 Junio - 16 UTC	158	F2
09-15 Julio (20)	13 Julio - 15 UTC	174	G2
29-04 Septiembre (21)	30 Agosto - 16 UTC	153	C9
13-23 Septiembre (22)	15 Septiembre - 16 UTC	148	B2
04-11 Octubre (23)	07 Octubre - 23 UTC	169	B2
Año 2006			
03-10 Junio (24)	07 Junio - 18 UTC	179	C9
30-11 Julio (25)	01 Julio - 12 UTC	151	C9
13-26 Julio (26)	17 Julio - 17 UTC	172	B2
29-03 Septiembre (27)	31 Agosto - 17 UTC	155	C9
03-09 Septiembre (28)	06 Septiembre - 13 UTC	160	C9
Año 2007			
16-25 Abril (29)	21 Abril - 20 UTC	155	B2
02-10 Mayo (30)	06 Mayo - 06 y 10 UTC	138	B2
05-12 Junio (31)	07 Junio - 15 UTC	135	C9
01-06 Agosto (32)	04 Agosto - 17 UTC	166	B1

Tabla 3.7: Episodios de inmisión de ozono troposférico identificados en el período Julio 2002 - Agosto 2007, según datos horarios recogidos en cinco estaciones de la Red de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa - As Pontes (B1, B2, C9, F2 y G2). El mes indicado en la duración del episodio siempre corresponde al mes de finalización (por ejemplo, 30-16 Agosto indica 30 Julio - 16 Agosto).

### 3.5.2 Análisis sinóptico

Esta sección describe el estudio de las situaciones sinópticas asociadas a la dinámica de ozono troposférico en el noroeste de Galicia, a partir de los episodios con altos niveles de ozono previamente identificados, siguiendo la metodología descrita en el apartado 2.2 del capítulo anterior.

La descripción comienza con un análisis preliminar de las condiciones sinópticas de las jornadas de cada uno de los episodios, a partir de mapas sinópticos de superficie y topografías a 850 y 500 hPa. Posteriormente se han determinado los patrones sinópticos característicos de cada episodio, atendiendo sólo a la jornada en la que se mide el máximo valor de ozono en cada episodio, y de acuerdo con la clasificación establecida por Font Tullot para la península Ibérica en 1983. De nuevo se han utilizado los mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa, así como los meteoros registrados en todas las estaciones meteorológicas disponibles en Galicia, aportados por MeteoGalicia, servicio meteorológico perteneciente a la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia.

#### Análisis preliminar de las condiciones sinópticas

El análisis sinóptico preliminar describe las características principales de la dinámica sinóptica que presenta cada uno de los 32 episodios, según se muestra a continuación:

##### 1) Episodio 14-23 Julio 2002

Anticiclón de 1030 mb situado sobre las Azores, que va desplazando su influencia hacia el NO de la península Ibérica, provocando circulación del E, aunque a partir del día 19 pasa a circulación débil del N, debido a una borrasca relativa situada al O de Galicia, que ocasiona un pantano barométrico. Predominio de estabilidad atmosférica, con altas temperaturas a 850 mb, sobre todo a partir del día 19.

##### 2) Episodio 11-17 Agosto 2002

Anticiclón situado al O de las Azores, entrando en forma de cuña sobre Galicia y provocando circulación del SE a partir del día 12, favorecida por un anticiclón débil sobre Centroeuropa. Altas temperaturas en 850 mb a partir del día 12.

##### 3) Episodio 23-04 Septiembre 2002

Anticiclón de bloqueo centrado al NO de Galicia, que origina vientos del E. Aumento de las temperaturas en 850 mb a partir del 29 de Agosto, aunque sin alcanzar valores muy elevados.

##### 4) Episodio 09-18 Septiembre 2002

Anticiclón centrado al N de Galicia, sobre Escandinavia y las Islas Británicas, y bajas presiones al O de las costas portuguesas, de modo que la circulación es de componente S-SE. Temperaturas a 850 mb en ascenso a partir del día 11.

##### 5) Episodio 21 Septiembre - 01 Octubre 2002

Altas presiones al N de Galicia, sobre las Islas Británicas, comprimidas de nuevo por bajas presiones al O de las costas portuguesas (figura 3.28j), originando de nuevo circulación del SE. Temperaturas a 850 mb en ascenso a partir del día 25.

##### 6) Episodio 16-24 Marzo 2003

Anticiclón de bloqueo al N de Galicia, sobre las Islas Británicas (figura 3.28f), hasta el día 22. Esto origina circulación del SE, hasta que aumenta la inestabilidad debido al aire frío en altura a partir del día 23. Altas temperaturas a 850 mb los días 19, 21 y 22.

7) Episodio 26-01 Junio 2003

Anticiclón desplazándose desde el O de Galicia en dirección NE, hacia Escandinavia, provocando vientos de componente E y altas temperaturas, que finalizan con la entrada de una borrasca. Temperaturas a 850 mb en ascenso, muy elevadas hasta el día 1.

8) Episodio 18-24 Junio 2003

Situación anticiclónica de gran estabilidad, debido al anticiclón situado al NO de Galicia que se va desplazando hacia las Islas Británicas (figura 3.28a), y provoca circulación del SE. La entrada de aire norteafricano los días del 18 al 21 causa un gran ascenso de las temperaturas a 850 mb.

9) Episodio 06-13 Julio 2003

Anticiclón de las Azores extendiéndose hacia el NO de Europa (figura 3.28h), dejando gran estabilidad y circulación del E hasta la entrada de un frente de bajas presiones. Temperaturas a 850 mb muy elevadas a partir del día 7.

10) Episodio 30-16 Agosto 2003

Anticiclón de las Azores extendiéndose hacia el NO, provocando altas presiones sobre el N de Europa, que acercaron aire muy caliente del N de África. Esta situación de ola de calor se mantuvo hasta el día 15, con la entrada de un centro de bajas presiones que cortó la circulación del SE. Temperaturas a 850 mb extremadamente altas hasta el día 15.

11) Episodio 12-22 Septiembre 2003

Anticiclón de bloqueo con el centro de altas presiones situado al N de Galicia, que impide desde esa posición el paso de las perturbaciones atlánticas y provoca circulación del SE. Esta situación finalizó el día 20 con la entrada de un centro de bajas presiones por el Atlántico, cambiando la circulación a SO. Muy altas temperaturas en 850 mb hasta el 15, disminuyendo progresivamente.

12) Episodio 14-22 Mayo 2004

Altas presiones situadas sobre las Islas Británicas, que causan circulación del E-SE, aumentando la inestabilidad a partir del día 20. Altas temperaturas en 850 mb, alcanzando el máximo los días 17,18 y 19.

13) Episodio 31-11 Junio 2004

Anticiclón situado al NO de Galicia y desplazándose en dirección NE, lo que deja vientos de SE y temperaturas muy altas en 850 mb desde el día 2. A partir del día 5, se produce un debilitamiento de estas altas presiones, causando la entrada de nieblas y brisas por la costa, con circulación del NE. Altas temperaturas a 850 mb, máximas los días del 2 al 5.

14) Episodio 12-19 Junio 2004

Situación muy semejante a la anterior, con el anticiclón situado al N de Galicia, sobre las Islas Británicas, causando circulación del SE y temperaturas altas a 850 mb, aunque menos que en los primeros días de este mes.

15) Episodio 28-05 Agosto 2004

Situación débilmente anticiclónica, debido al centro de altas presiones situado sobre Escandinavia (figura 3.28c), pero con tiempo bastante estable, sobre todo los primeros días del episodio. Forzamiento sinóptico muy débil, con circulación del E y situación de pantano barométrico los días 29, 30 y 31 de Julio. Altas temperaturas a 850 mb, sobre todo los días 30 y 31.

16) Episodio 11-17 Marzo 2005

Anticiclón de 1045 mb situado sobre Groenlandia (figura 3.28g), que extiende su influencia hasta el N peninsular durante los tres primeros días del episodio, provocando circulación del E-SE. A partir del día 14, la formación de un centro profundo de bajas presiones y su aproximación desde el Atlántico origina un rodamiento de la circulación hacia el SO, aunque se mantiene la situación anticlónica. Predominio de estabilidad atmosférica, con altas temperaturas a 850 mb al inicio y final del episodio, que descienden en los días centrales.

17) 27-01 Mayo 2005

Anticiclón situado al S de las Azores, que se va desplazando hacia el E, situándose sobre Centroeuroa y retrasando hasta el día 1 de Mayo la entrada de las depresiones atlánticas situadas al N de las Azores y sobre las Islas Británicas. La circulación predominante es del S-SO, favorecida por las borrascas situadas al O de Portugal. Temperaturas a 850 mb en ascenso, alcanzando valores altos los días centrales del episodio (días 28, 29 y 30).

18) Episodio 22-28 Mayo 2005

Anticiclón de 1025 mb sobre las Azores, que se desplaza hacia el O, formando una gran área anticlónica sobre Europa Central durante los días 25, 26 y 27, causando un pantano barométrico sobre la Península Ibérica y caracterizado por vientos débiles de componente S-SE. Las temperaturas en 850 mb alcanzaron valores elevados los días centrales del episodio (días 25-27).

19) Episodio 16-25 Junio 2005

Anticiclón centrado al N de Galicia, al S de las Islas Británicas, originando un período de gran estabilidad, circulación débil de componente E-SE y temperaturas a 850 mb muy elevadas durante todo el episodio, con entradas de aire subsahariano los primeros días del episodio (16-17) y a partir del día 22.

20) Episodio 09-15 Julio 2005

Situación anticlónica debido a las altas presiones de 1030 mb situadas sobre las Islas Azores, que se desplazan hacia las Islas Británicas (figura 3.28d), provocando circulación de componente E. Temperaturas a 850 mb elevadas los días centrales del episodio (días 12-14).

21) Episodio 29-04 Septiembre 2005

Centros de altas presiones situados sobre Europa Central a comienzos del episodio (días 29 y 30), que dejan paso a una situación intermedia entre las altas y bajas presiones, hasta que el día 2 se recupera la influencia anticlónica, con un área de altas presiones que se extiende desde la Azores hasta Escandinavia. La circulación es variable durante este período, aunque domina la componente S. La temperatura a 850 mb es elevada durante las primeras jornadas (29 y 30), en las que hubo intrusiones de masas de aire cálido procedente del N de África, y más suave el resto del episodio, aumentando a partir del día 2.

22) Episodio 13-23 Septiembre 2005

Anticiclón de bloqueo centrado sobre las Azores, que extiende su influencia al resto de Europa, impidiendo el paso de frentes (salvo el de la jornada 16) y provocando vientos de componente E-SE. Las temperaturas a 850 mb son elevadas las jornadas del 14 y 15, disminuyendo las jornadas siguientes para recuperarse de nuevo a partir del día 20, con valores altos los días 21-23.

23) Episodio 04-11 Octubre 2005

Anticiclón de 1030 mb situado al S de la península Escandinava, que se va desplazando hacia el NE, situándose el día 7 sobre Europa Central y bloqueando la llegada de borrascas hasta el

día 11. La circulación es de componente S, favorecida por la influencia de un centro de bajas presiones que se va acercando a la Península Ibérica desde las Azores. Las temperaturas a 850 mb mantienen valores altos hasta la jornada 8.

#### 24) Episodio 03-10 Junio 2006

Altas presiones estacionarias situadas sobre las Islas Británicas (figura 3.28b), afectando directamente a la Península Ibérica, y área depresionaria al O de las costas portuguesas, que se va aproximando desde las Azores hasta afectar al norte peninsular al final del episodio, una vez debilitado y desplazado el anticiclón hacia Centroeuropa. Esta situación sinóptica clásica provoca circulación de componente S-SE y la llegada de masas de aire africano a la península, con lo cual las temperaturas experimentan un fuerte ascenso, puesto de manifiesto en los reanálisis a 850 mb de las jornadas 4, 5, 6 y 7.

#### 25) Episodio 30-11 Julio 2006

Situación inestable, con aire frío en altura, durante los primeros cinco días del episodio, entrando progresivamente a partir del día 6 el anticiclón de las Azores, que acaba afectando a toda Europa Central, estableciéndose un área de altas presiones desde la península hasta Europa Oriental y Central, quedando la península Ibérica bajo un pantano barométrico. La circulación es de componente O durante los primeros días, rolando a vientos del NE una vez establecidas las condiciones anticiclónicas. Esta situación de ola de calor se mantuvo hasta el día 15, con la entrada de un centro de bajas presiones que cortó la circulación del SE. Temperaturas elevadas a 850 mb en las jornadas 1, 9, 10 y 11.

#### 26) Episodio 13-26 Julio 2006

Potente anticiclón de bloqueo con el centro de altas presiones situado al N de Galicia, sobre las Islas Británicas, afectando a toda Europa, y que impide desde esa posición el paso de las perturbaciones atlánticas hasta el día 18, con la entrada de un frente poco intenso. A partir de esta jornada, la situación continúa siendo anticiclónica, pero más debilitada, con la Península Ibérica situada entre el anticiclón de las Azores y el anticiclón Centroeuropeo. La circulación hasta el día 18 es de componente E-NE, rolando posteriormente a componente O-SO, mientras en los últimos días del episodio se recupera la componente E. Muy altas temperaturas en 850 mb hasta el 18, disminuyendo progresivamente hasta la jornada del 22, y recuperándose los días 22, 23 y 24.

#### 27) Episodio 29-03 Septiembre 2006

Anticiclón de las Azores penetrando en forma de cuña en el norte peninsular durante las dos jornadas iniciales del episodio (días 29 y 30), para extenderse hacia Europa Central el día 31, jornada central del episodio, situándose el centro de altas presiones sobre el oeste de Francia, acompañado de una baja térmica peninsular. El anticiclón se va debilitando durante las jornadas siguientes, quedando dividido en dos centros de acción, uno centrado en las Islas Azores y otro sobre el este de Europa. La circulación es de componente E-SE durante las jornadas iniciales, rolando al NE los tres últimos días. La temperatura a 850 mb es elevada durante las jornadas centrales, día 31 y 1, debido a la influencia de la dorsal que afecta a la península Ibérica durante esos días.

#### 28) Episodio 03-09 Septiembre 2006

Anticiclón situado al N de la península Ibérica, cuyo centro se mueve lentamente hacia el NE, quedando situado sobre Europa Central el día 6, con 1020 mb. Este desplazamiento provoca circulación débil de componente E-SE durante las primeras jornadas del episodio, acompañada de elevadas temperaturas a 850 mb en las jornadas 5, 6, 7 y 8. Dorsal anticiclónica a 500 mb penetrando desde el NO de África.

#### 29) Episodio 16-25 Abril 2007

Anticiclón de 1030 mb situado al O de las Islas Británicas, debilitándose y moviéndose lentamente en dirección E hasta situar su centro sobre el mar del Norte la jornada 21 (figura 3.28e). Las jornadas siguientes se crea una franja de altas presiones desde Azores hasta Europa del Este, al unirse el centro citado de altas presiones con el anticiclón de las Azores, que va aumentando su influencia desde el día 20. A pesar de las condiciones anticiclónicas, existe inestabilidad en altura afectando al oeste peninsular durante las jornadas centrales del episodio (días 20 y 21), con reflejo en superficie en forma de bajas presiones relativas sobre el litoral oeste peninsular el día 20. Los vientos soplan del E durante las seis primeras jornadas del período, debilitándose su intensidad a medida que pasan los días. Las temperaturas a 850 mb son elevadas para la época del año durante los días centrales del episodio, pero desacopladas de la dorsal norteafricana.

#### 30) Episodio 02-10 Mayo 2007

Anticiclón de 1030 mb situado sobre las Islas Azores (figura 3.28i), extendiendo progresivamente su influencia hacia el oeste de la península Ibérica, y desplazándose lentamente hacia el este, hasta colocar su centro sobre la meseta peninsular el día 9. Los vientos soplan del N-NO durante la mayor parte del episodio. Las temperaturas a 850 mb son bajas comparadas con la mayoría de episodios, e incluso para la estación del año, aunque aumentan a partir de la jornada 6. Ello se debe a la permanencia de aire frío en altura a causa de la vaguada (acompañada de borrascas en superficie) que afectó a la península Ibérica hasta el día 5 incluido.

#### 31) Episodio 05-12 Junio 2007

Condiciones atípicas para un episodio de niveles medio-altos de ozono troposférico, dado que la situación sinóptica viene caracterizada por un centro de bajas presiones situado sobre las Azores, que extiende progresivamente su influencia al noroeste peninsular, dejando vientos de dirección S-SE sobre Galicia. Realmente, la influencia mayor en las concentraciones de ozono se debe quizá al efecto residual provocado por el anticiclón situado al norte de las Islas Británicas durante las jornadas previas al día que se alcanza el máximo de ozono, el día 7, manteniéndose esa circulación E-SE. Las temperaturas a 850 mb son intermedias, pues el aire frío en altura asociado a esta borrasca no afecta al norte de la península Ibérica hasta el final del episodio.

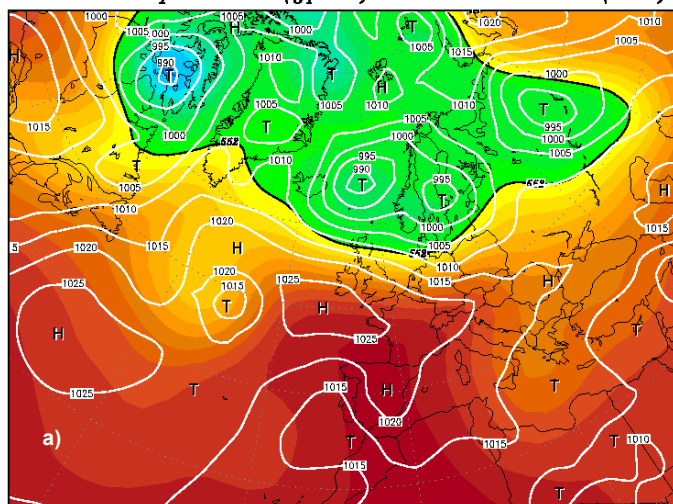
#### 32) Episodio 01-06 Agosto 2007

Situación de pantano barométrico, con altas presiones extendiéndose desde las Azores hasta Centroeuropa y baja térmica peninsular. El anticiclón presenta dos núcleos de 1025 mb en sus extremos, uno mayor sobre las Azores y el otro sobre Europa Central. La circulación de viento es muy débil, y de componente E-SE. El eje de la dorsal anticiclónica a 500mb atraviesa la península Ibérica por su centro, de sur a norte, causando elevadas temperaturas a 850 mb, sobre todo los días 4 y 5.

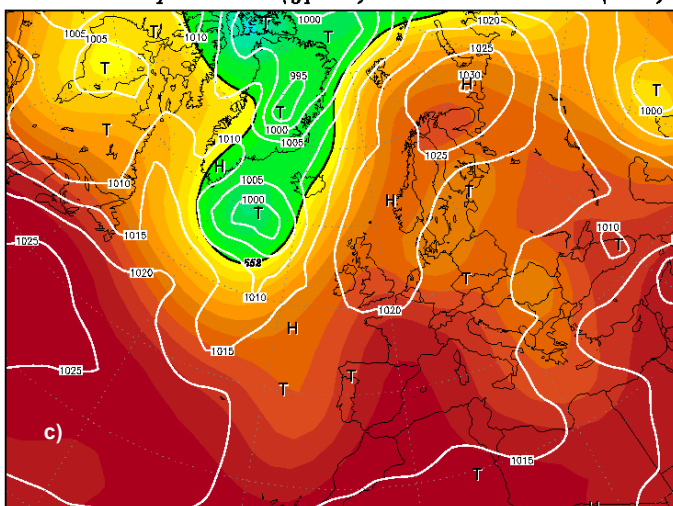
Este análisis inicial indica que la gran mayoría de los episodios de inmisión de ozono troposférico se desarrollan bajo una situación sinóptica de carácter anticiclónico, con altas presiones centradas al norte de la península Ibérica, generalmente sobre las Islas Británicas y/o Europa Central, y dorsal en altura atravesando la península Ibérica desde el norte de África (casos a, b, c, e, h y j en la figura 3.28). Este anticiclón Británico-Centroeuropo provoca circulación de componente Este sobre Galicia, que se traduce en vientos regionales del Este o Sureste, y temperaturas muy elevadas, sobre todo en período estival. Estas observaciones coinciden con las referidas en la bibliografía (Beck et al., 1998), según la cual el mayor número de episodios en la península Ibérica se producen bien con una cuña de altas presiones afectando a Centroeuropa, altas presiones sobre las Islas Británicas o Europa Central, en el caso de España, o con altas presiones sobre Centroeuropa, causando flujo del Nordeste, en el caso de Portugal.



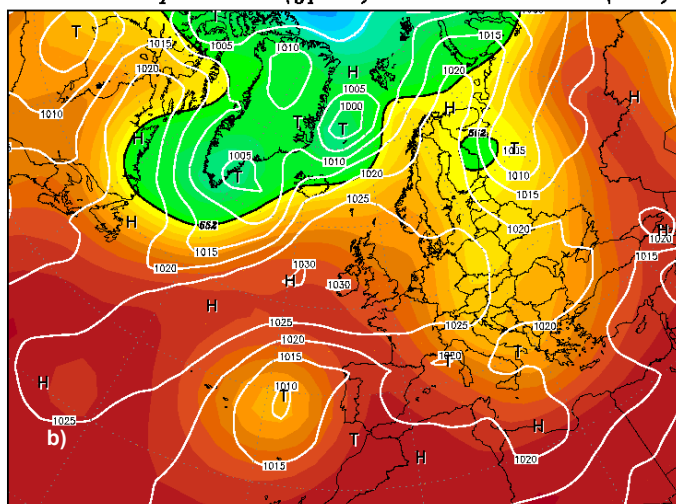
20JUN2003 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



01AUG2004 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



07JUN2008 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



13JUL2005 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

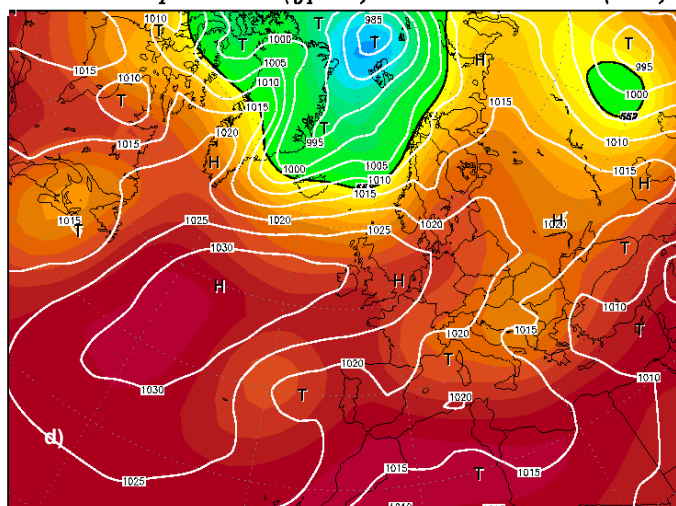
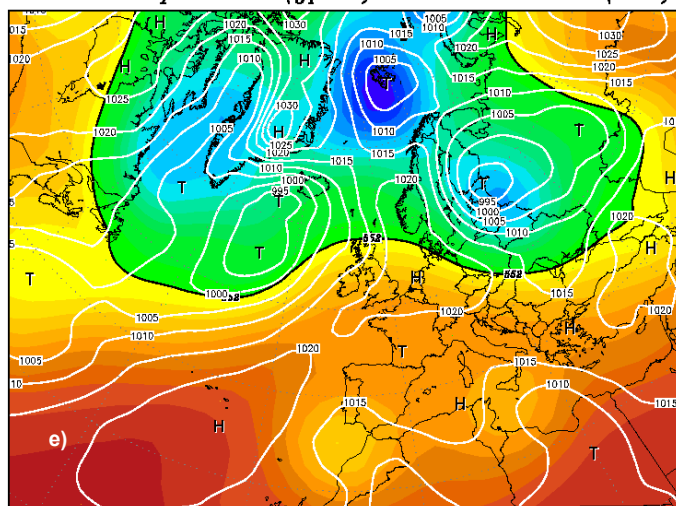


Figura 3.28: “Mapas sinópticos de superficie (hPa) y a 500 hPa (decámetros geopotenciales) representativos de los nueve tipos de situaciones sinópticas identificadas por Font-Tullot y relacionados con episodios de ozono superficial en el noroeste de Galicia: a) y b) ‘Altas presiones sobre el Atlántico y Europa’, c) ‘Pantano barométrico’, d) ‘Vaguada ibero-africana’, e) ‘Depresión del Golfo de Cádiz’, f) ‘Anticiclón británico-escandinavo’, g) ‘Circulación ondulada a bajas latitudes’, h) ‘Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular’, i) ‘Anticiclón atlántico-mediterráneo’ y j) ‘Anticiclón centroeuropeo’. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)”

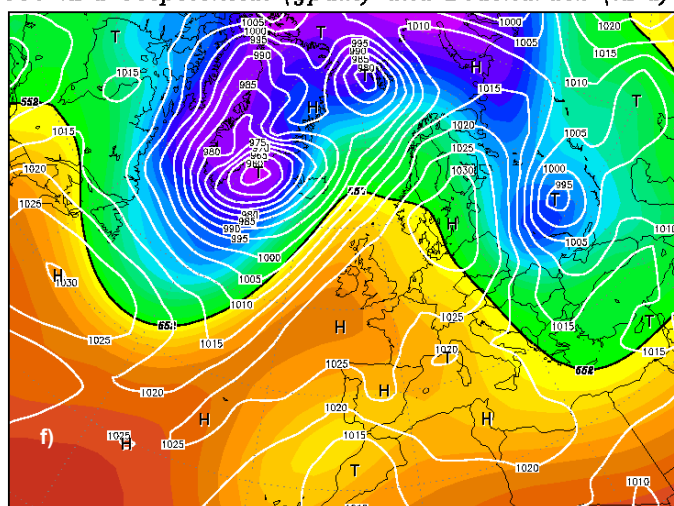
21APR2007 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



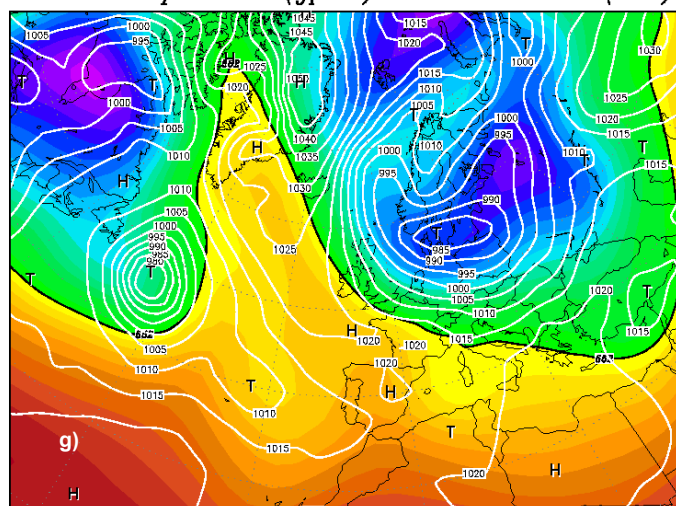
21MAR2003 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



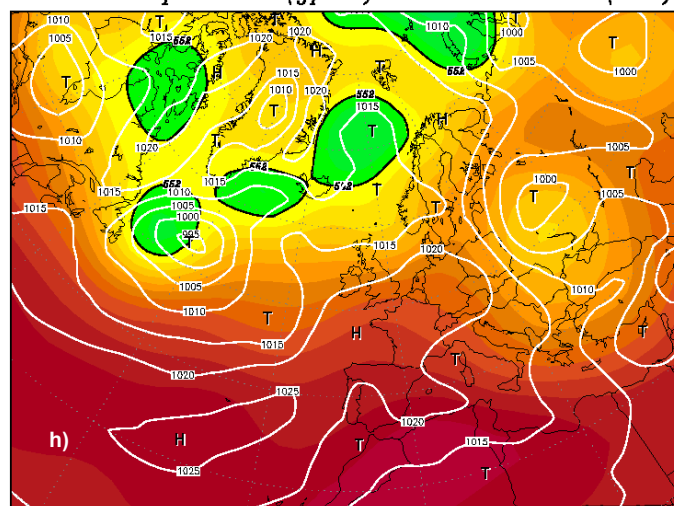
12MAR2005 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



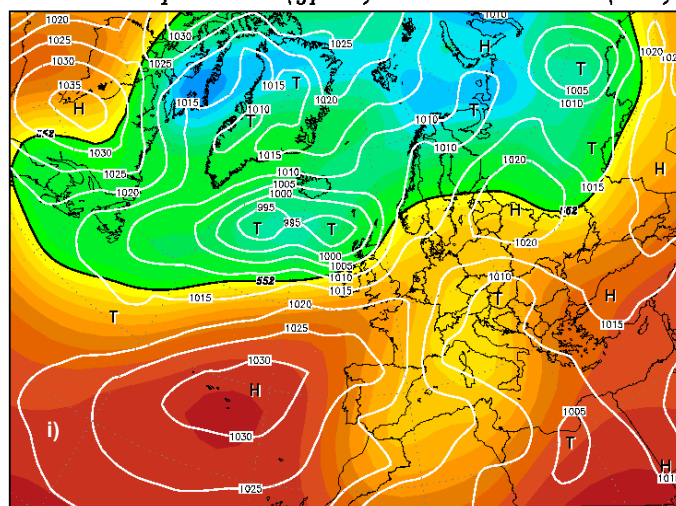
08JUL2003 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



08MAY2007 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



27SEP2002 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

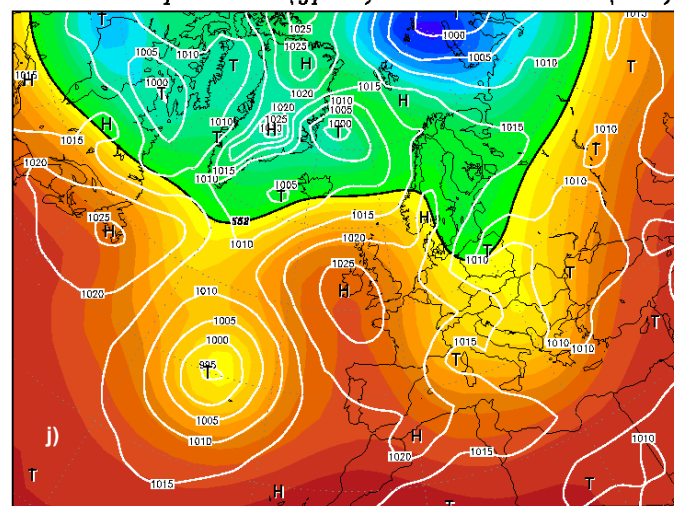


Figura 3.28 (continuación): "Mapas sinópticos de superficie (hPa) y a 500 hPa (decámetros geopotenciales) representativos de los nueve tipos sinópticos de Font-Tullot y relacionados con episodios de ozono en el NO de Galicia: a) y b) 'Altas presiones sobre el Atlántico y Europa', c) 'Pantano barométrico', d) 'Vaguada ibero-africana', e) 'Depresión del Golfo de Cádiz', f) 'Anticiclón británico-escandinavo', g) 'Circulación ondulada a bajas latitudes', h) 'Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular', i) 'Anticiclón atlántico-mediterráneo' y j) 'Anticiclón centroeuropeo'. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)"

En muchos episodios, la componente Este rola ligeramente hacia el Sur, dando lugar a vientos del S-SE debido a dos factores distintos, actuando simultáneamente en algunos episodios:

- el establecimiento de bajas térmicas relativas situadas sobre la meseta castellana (como ejemplo puede observarse la figura 3.28h), sobre todo en el período central del día, donde la temperatura del aire es más elevada (episodios nº 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 20 y 24).
- depresiones poco intensas situadas al oeste de las costas portuguesas (por ejemplo, la figura 3.28b), que se acercan lentamente a la Península Ibérica, causando un flujo de aire de componente sur (episodios nº 4, 7, 13, 15, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 y 32).

La citada circulación de componente S-SE causa en algunos de los episodios la entrada de aire cálido y seco procedente del norte de África, dando lugar a días de calor extremo aun en el norte peninsular, aislados o formando parte de olas de calor (episodio nº 8, 10, 19, 21, 24, 26, 28 y 32), como se muestra en la figura 3.29.

20JUN2003 00Z

### 850 hPa Temperatur (Grad C)

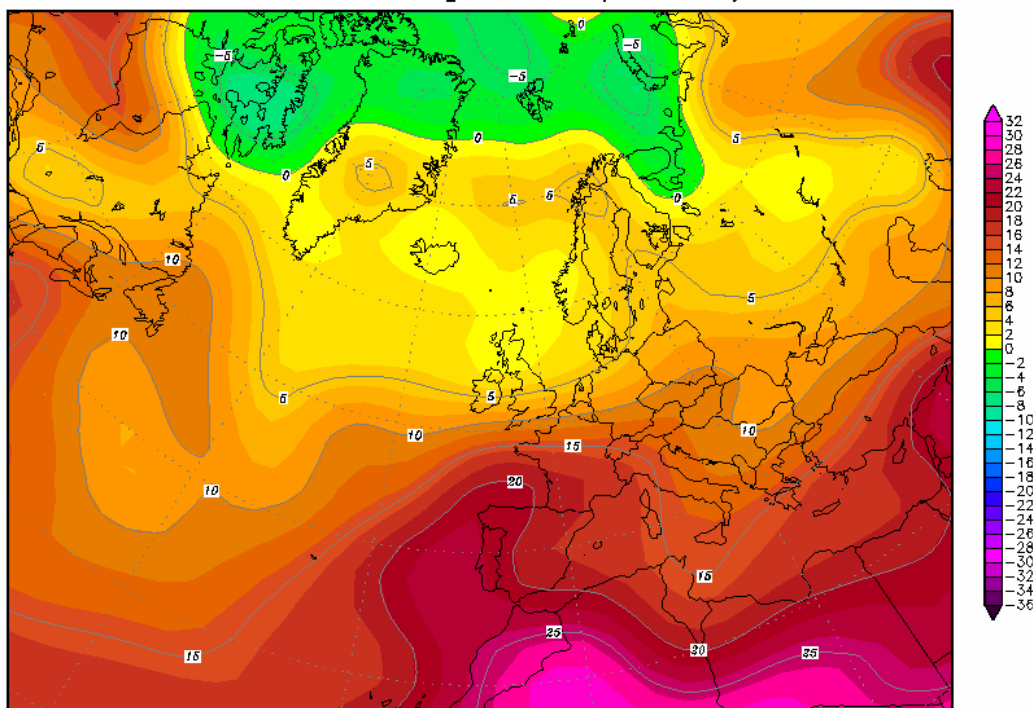


Figura 3.29: “Mapa sinóptico a 850 hPa correspondiente al día 20 de Junio de 2003 (episodio nº 8), mostrando las altas temperaturas que se alcanzan en el norte peninsular debido a la circulación sinóptica de componente S-SE que favorece la entrada de masas de aire procedentes del norte de África. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)”

La mayoría de los episodios suelen terminar con la entrada de frentes atlánticos tras el debilitamiento de la situación anticiclónica, con vientos del Suroeste, que bajan las temperaturas máximas y dejan algunas precipitaciones (Beck et al., 1998).

Estas son condiciones sinópticas típicamente favorables para la formación del ozono, como las elevadas temperaturas, que aceleran las reacciones de formación de ozono a partir de los radicales generados por las reacciones fotoquímicas, y la gran estabilidad atmosférica, que tiende a acumular precursores de ozono, aumentando su tiempo de residencia al impedir la renovación del aire debido a la subsidencia. Los vientos de componente E y SE son otro factor a considerar, desde el punto de vista del transporte advectivo de ozono, aunque en este caso también pueden tener gran influencia fenómenos de carácter local, como las brisas o los vientos de valle.

Episodio	Fecha	Inmisión ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) / Estación	Situación sinóptica
Año 2002			
14-23 Julio (1)	18 Julio	201 (B1)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
11-17 Agosto (2)	14 Agosto	142 (C9)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
23-04 Septiembre (3)	02 Septiembre	157 (F2)	Pantano barométrico
09-18 Septiembre (4)	14 Septiembre	136 (B1)	Depresión del golfo de Cádiz
21-30 Septiembre (5)	27 Septiembre	145 (F2)	Anticiclón centroeuropeo
Año 2003			
16-24 Marzo (6)	21 Marzo	148 (B2)	Anticiclón británico-escandinavo
26-01 Junio (7)	29 Mayo	161 (B2)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
18-24 Junio (8)	20 Junio	210 (B1)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
06-13 Julio (9)	08 Julio	139 (C9)	Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular
30-16 Agosto (10)	07 Agosto	174 (C9)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
12-22 Septiembre (11)	16 Septiembre	193 (G2)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
Año 2004			
14-22 Mayo (12)	19 Mayo	170 (F2)	Vaguada ibero-africana
31-11 Junio (13)	05 Junio	156 (B1)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
12-19 Junio (14)	17 Junio	196 (B2)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
28-05 Agosto (15)	01 Agosto	181 (B2)	Pantano barométrico
Año 2005			
11-17 Marzo (16)	12 Marzo	144 (F2)	Circulación ondulada a bajas latitudes
27-01 Mayo (17)	30 Abril	141 (B2)	Pantano barométrico
22-28 Mayo (18)	26 Mayo	167 (C9)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
16-25 Junio (19)	22 Junio	158 (F2)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
09-15 Julio (20)	13 Julio	174 (G2)	Vaguada ibero-africana
29-04 Septiembre (21)	30 Agosto	153 (C9)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa

13-23 Septiembre (22)	15 Septiembre	148 (B2)	Vaguada ibero-africana
04-11 Octubre (23)	07 Octubre	169 (B2)	Anticiclón británico-escandinavo
Año 2006			
03-10 Junio (24)	07 Junio	179 (C9)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
30-11 Julio (25)	01 Julio	151 (C9)	Pantano barométrico
13-26 Julio (26)	17 Julio	172 (B2)	Vaguada ibero-africana
29-03 Septiembre (27)	31 Agosto	155 (C9)	Vaguada ibero-africana
03-09 Septiembre (28)	06 Septiembre	160 (C9)	Pantano barométrico
Año 2007			
16-25 Abril (29)	21 Abril	155 (B2)	Depresión del golfo de Cádiz
02-10 Mayo (30)	06 Mayo	138 (B2)	Anticiclón atlántico-mediterráneo
05-12 Junio (31)	07 Junio	135 (C9)	Pantano barométrico
01-06 Agosto (32)	04 Agosto	166 (B1)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa

Tabla 3.8: Clasificación sinóptica de los episodios con altos niveles de ozono troposférico registrados en el noroeste de Galicia durante el período Julio 2002 - Agosto 2007, siguiendo la clasificación sinóptica de Font Tullot"



## Clasificación sinóptica de los episodios

Tras obtener una visión general del desarrollo de los episodios de ozono en relación con las condiciones sinópticas, se ha realizado una clasificación de los mismos, agrupando aquellos que presentan condiciones sinópticas semejantes. Para ello se ha empleado la clasificación sinóptica de Font Tullot para la península Ibérica (Font Tullot, 1983), descrita en el capítulo anterior, considerando sólo la situación sinóptica del día en el cual se registra el máximo de ozono del episodio.

Los treinta y dos episodios identificados en la sección anterior pueden agruparse en nueve patrones sinópticos principales, según la clasificación utilizada de Font Tullot, como se muestra en la tabla 3.8. A continuación se describen, ordenados por frecuencia de aparición, estos nueve tipos de tiempo predominantes durante los episodios con altos niveles de ozono, ejemplificándolos con un mapa de presión en superficie y topografía a 500 hPa (figura 3.28):

### 1) Tipo 9.I.M.e “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”

En superficie este tipo se caracteriza por el alejamiento hacia el oeste del anticiclón de las Azores y por la extensión de las altas presiones hacia el este cubriendo la mayor parte de Europa y del Mediterráneo, mientras en altura el anticiclón africano desplazado hacia el norte cubre toda la Península dentro de su radio de acción (figura 3.28 a-b).

Suele durar alrededor de una semana y, aunque puede presentarse desde finales de mayo a principios de octubre, sólo es relativamente frecuente en julio y agosto.

La falta de los vientos del Norte en el Oeste de la Península da lugar al predominio absoluto de la masa de aire cT recalentada. Además, la presencia de aire caliente en altura, que se extiende sobre la Península en forma de lengua, crea una gran estabilidad que reduce el intercambio vertical de aire a una capa superficial relativamente delgada, donde se acumula el calor producido por el calentamiento diurno del suelo, con lo que la temperatura del aire alcanza valores muy altos. Además, al no haber corrientes ascendentes, no se forman los característicos cúmulos, por lo que la mayor radiación favorece el calentamiento del suelo. Para que todo esto suceda no se precisa que haya una inversión de temperatura en altura, basta con que exista una capa isoterma o una reducción importante en el gradiente vertical.

Es durante estas situaciones cuando tienen lugar las olas de calor más importantes, de las que únicamente se libran las regiones costeras cantábrica y atlántica noroccidental.

### 2) Tipo 21.II “Pantano barométrico”

En superficie, la falta de gradiente barométrico en una extensa área alrededor de la Península constituye su característica distintiva general, mientras que en altura predominan las calmas. En verano, la situación se distingue por la presencia de varios centros de altas presiones sobre el Atlántico y por la corriente superior del Este a latitudes inferiores a los 40° (figura 3.28 c).

Con una duración de 3 a 15 días, puede presentarse en cualquier mes, pero con una clara preferencia por los meses estivales.

La masa de aire mT (sub) puede modificarse sustancialmente sobre la Península hasta convertirse en una masa autóctona.

Los veranos en que este tipo es más frecuente de lo normal se caracterizan en la Europa occidental y central por su sequedad, dando lugar a una de las anomalías más espectaculares de su clima.

### 3) Tipo 18.I.D “Vaguada ibero-africana”

Extenso anticiclón atlánticoeuropeo, tanto en superficie como en altura, con dos características distintivas: el restablecimiento en altura de la circulación zonal y la presencia en el mapa de superficie de una vaguada, con su eje orientado según los meridianos (figura 3.28 d). Estas vaguadas son el reflejo en el campo bórico de las conocidas ondulaciones que se forman en la corriente general del Este en el margen meridional de las altas presiones subtropicales.

Con una duración mínima de 3 días y máxima de unos 25 días, es uno de los tipos más frecuentes, sobre todo en los meses de noviembre a marzo y también en junio. Su menor frecuencia tiene lugar en abril y de julio a septiembre.

Con la excepción del verano, en el resto del año la masa de aire mT(sub) es la predominante sobre la Península, aunque más o menos desecada. El tiempo es generalmente bueno, con posibles nieblas continentales. En verano domina claramente la masa cT, siendo frecuentes las olas de calor.

### 4) Tipo 16.I.D.i “Anticiclón británico-escandinavo”

Este tipo se caracteriza por un potente anticiclón en superficie y altura y depresión fría sobre el Mediterráneo, con el correspondiente predominio de los vientos del Este sobre la Península, que caracterizan este tipo (figura 3.28 f).

Con una duración máxima de una semana, es poco frecuente; su presencia queda prácticamente limitada al semestre invernal pero con preferencia al período de noviembre a marzo.

Ocasionalmente, la región nororiental de la Península es afectada por la masa cP, aunque generalmente la barrera pirenaica-alpina la defiende lo suficiente para que toda la Península quede bajo la influencia de una masa de aire templada a causa de su recorrido sobre el Mediterráneo. En consecuencia, el tiempo suele ser seco y soleado, aunque con cierta inestabilidad sobre las Baleares. En ocasiones, cuando el flujo sobre el Mediterráneo es más del Este, pueden haber lluvias importantes en el litoral mediterráneo.

### 5) Tipo 13.I.D “Depresión del golfo de Cádiz”

Las depresiones en el Golfo de Cádiz constituyen uno de los factores más influyentes del tiempo atmosférico peninsular, dependiendo en gran parte de su frecuencia las cantidades anuales de precipitación en el cuadrante suroriental de la Península (figura 3.28 e). No obstante, su identificación como tipo de tiempo se hace muy difícil bajo el punto de vista dinámico, dados los distintos procesos que conducen a la presencia de dichas depresiones.

Aunque no son muy frecuentes estas depresiones pueden presentarse en cualquier mes, salvo en julio y agosto, y su permanencia en el Golfo de Cádiz rara vez pasa de 3 días.

Como quiera que este tipo ha ido precedido del desplazamiento de masas de aire mP hasta latitudes subtropicales, generalmente es esta masa la única que entra en juego, aunque calentada, siendo frecuente que carezca de sistema de frentes.

Estas situaciones dan lugar a lluvias importantes en la mitad Sur de la Península y en la vertiente mediterránea, que pueden ser muy intensas en Levante y en el Sudeste, acompañadas de tormentas.

### 6) Tipo 5.I.Z.e “Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular”

En superficie, su principal característica es la depresión térmica, centrada bien sobre la Meseta Sur o el centro de la Península (figura 3.28 h). Cuando la circulación en el margen oriental del anticiclón de las Azores es muy intensa, la baja no se desarrolla o queda

reducida a una vaguada. En altura se distingue una vaguada cuyo eje se orienta de NE a SO, a la que corresponde un flujo superior del SO sobre una gran parte de la Península. Esta torsión de la circulación zonal es producida por el extenso anticiclón térmico superior que en verano se desarrolla sobre África como respuesta a la depresión térmica sahariana.

Estas situaciones suelen ser muy persistentes, no siendo raro que duren más de dos semanas, pueden presentarse desde finales de mayo hasta últimos de septiembre, aunque sean julio y agosto los meses en que son más frecuentes.

En ellas entran en juego dos masas de aire muy distintas.

- a) La mT(sub) sometida a la circulación en torno al anticiclón de las Azores pero que, a causa de los sistemas orográficos del Norte y Noroeste de la Península, se ve obligada a contornearla, por lo que sólo las periferias cantábrica y atlántica occidental quedan bajo sus influencias. En la periferia occidental, la constancia de los vientos templados del Norte constituyen la característica principal.
- b) La cT africana-peninsular que afecta al resto de la Península y que en las situaciones más persistentes se transforma en la masa autóctona ibérica. Frecuentemente, en aquellas situaciones en que la vaguada superior aparece desplazada hacia el este, el aire frío sobre la Península, a niveles altos, crea la inestabilidad necesaria para que se desarrollen las típicas tormentas de verano.

Las “olas del calor” son frecuentes bajo estas situaciones, sobre todo en el cuadrante suroriental de la Península.

#### 7) Tipo 11.I.M.i “Anticiclón centroeuropeo”

Presenta un potente anticiclón europeo y una profunda depresión atlántica, tanto en superficie como en altura, dando lugar en superficie a un intenso flujo del Sur (figura 3.28 j).

Su duración es de 3 a 5 días aunque ocasionalmente puede mantenerse hasta 10 días. Es poco frecuente y claramente invernal aunque en raras ocasiones también puede presentarse en primavera y otoño.

La masa mT predomina en la mitad occidental de la Península, mientras que en la vertiente mediterránea la cT de origen africano suele prevalecer.

La característica sobresaliente de este tiempo son las altas temperaturas, que alcanzan valores muy superiores a los normales, sobre todo en la vertiente cantábrica debido al efecto Föhn.

#### 8) Tipo 3.I.Z “Anticiclón atlántico-mediterráneo”

El anticiclón atlántico, centrado al suroeste de las Azores, se extiende en forma de cuña hasta el Mediterráneo occidental (figura 3.28 i), dando lugar a un flujo suave del NO sobre la Península o al predominio de las calmas.

En la mayoría de los casos tiene una duración de 5 a 10 días, aunque, con relativa frecuencia, llega a alcanzar e incluso a superar los 30 días. Puede presentarse en cualquier estación del año, salvo en verano. Su máxima frecuencia tiene lugar al final del invierno y en primavera.

La presencia de la masa mT(sub) es exclusiva. Las temperaturas son suaves aunque con importantes oscilaciones diurnas en casos de calmas o vientos débiles. Suele predominar el buen tiempo, aunque ocasionalmente se produzcan lloviznas o lluvias, generalmente débiles en la periferia norte.



#### 9) Tipo 23.III.i “Circulación ondulada a bajas latitudes”

Circulación del Oeste amplia y extensa, tanto en superficie como en altura, entre aproximadamente los paralelos 30° y 50°, con ondulación del vórtice circumpolar expandido, dibujándose claramente en el mapa de superficie el anticiclón atlántico centrado al sur de las Azores, así como otro a latitudes boreales. Entre ambos anticiclones una secuencia de borrascas se trasladan hacia el SE, llegando a abarcar la Península dentro de su radio de acción, en el momento de su máximo desarrollo (figura 3.28 g). Sus trayectorias a veces cruzan la Península, pero más frecuentemente pasan al norte de los Pirineos y menos frecuentemente cruzan el Estrecho. En este último caso suele ser en el Golfo de Cádiz donde la baja se manifiesta más profunda, siendo entonces la situación parecida a la del tipo 13.

La secuencia de las depresiones puede mantenerse durante varias semanas. Es un tipo específicamente invernal que no se presenta de junio a agosto y sólo raramente en mayo y septiembre.

Las masas mT (sub) y mP van alternando con predominio de la segunda, aunque muy atenuada, dando lugar a un tiempo muy revuelto y variable.

Las figuras 3.30 y 3.31 muestran la frecuencia de episodios asociados a cada patrón sinóptico y la media de los máximos diarios de ozono para cada situación sinóptica, dentro de los episodios considerados. Destaca el alto porcentaje de episodios asociados al patrón “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, que se corresponde con la presencia de la dorsal norteafricana en altura, que favorece las entrada de aire cálido procedente del norte de África, y con altas presiones al norte de la península Ibérica, causando circulación de componente Este, con lo cual se mantienen temperaturas elevadas en el área de estudio (figura 3.30). Los máximos niveles de ozono superficial se registran también bajo esta situación sinóptica, según se muestra en la figura 3.31, con lo cual este patrón es el más susceptible de causar episodios con altos niveles de ozono en el noroeste peninsular.

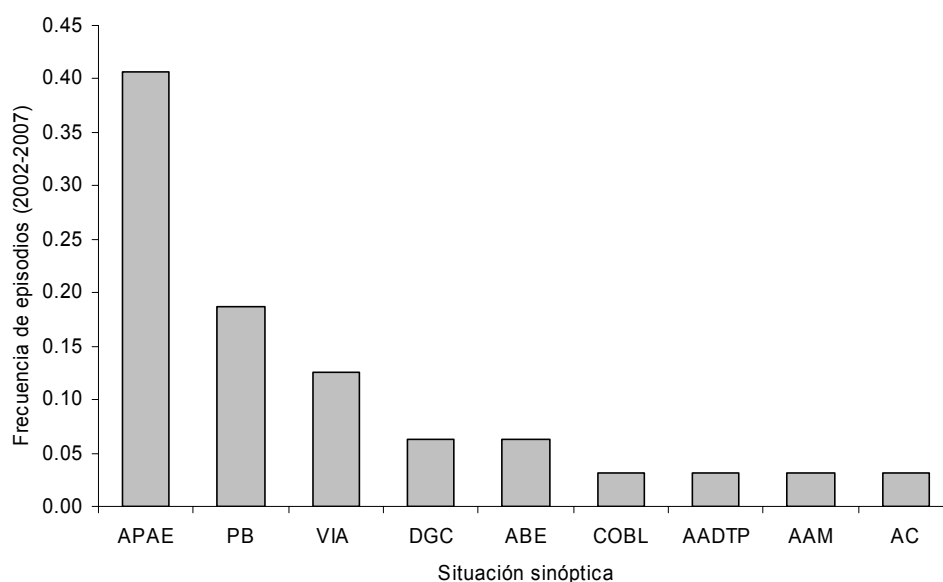


Figura 3.30: “Distribución de episodios en el período Julio 2002 – Agosto 2007 agrupados por patrones sinópticos de la clasificación de Font Tullot. Las siglas APAE indican ‘Altas presiones sobre el Atlántico y Europa’, PB ‘Pantano barométrico’, VIA ‘Vaguada ibero-africana’, DGC ‘Depresión del Golfo de Cádiz’, ABE ‘Anticiclón Británico-Europeo’, COBL ‘Circulación ondulada a bajas latitudes’, AADTP ‘Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular’, AAM ‘Anticiclón Atlántico-Mediterráneo’, y AC, ‘Anticiclón Centro europeo’”

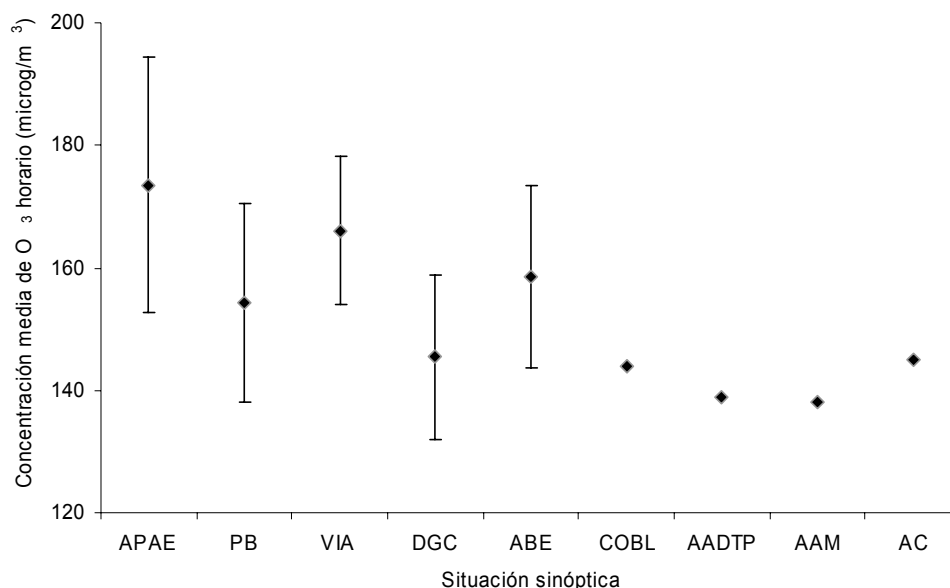


Figura 3.31: “Valores medios y desviación típica de los máximos diarios de ozono en los episodios asociados a cada patrón sinóptico identificado, según la clasificación de Font Tullot. Las siglas APAE indican ‘Altas presiones sobre el Atlántico y Europa’, PB ‘Pantano barométrico’, VIA ‘Vaguada ibero-africana’, DGC ‘Depresión del Golfo de Cádiz’, ABE ‘Anticiclón Británico-Europeo’, COBL ‘Circulación ondulada a bajas latitudes’, AADTP ‘Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular’, AAM ‘Anticiclón Atlántico-Mediterráneo’, y AC, ‘Anticiclón Centroeuropeo’ ”

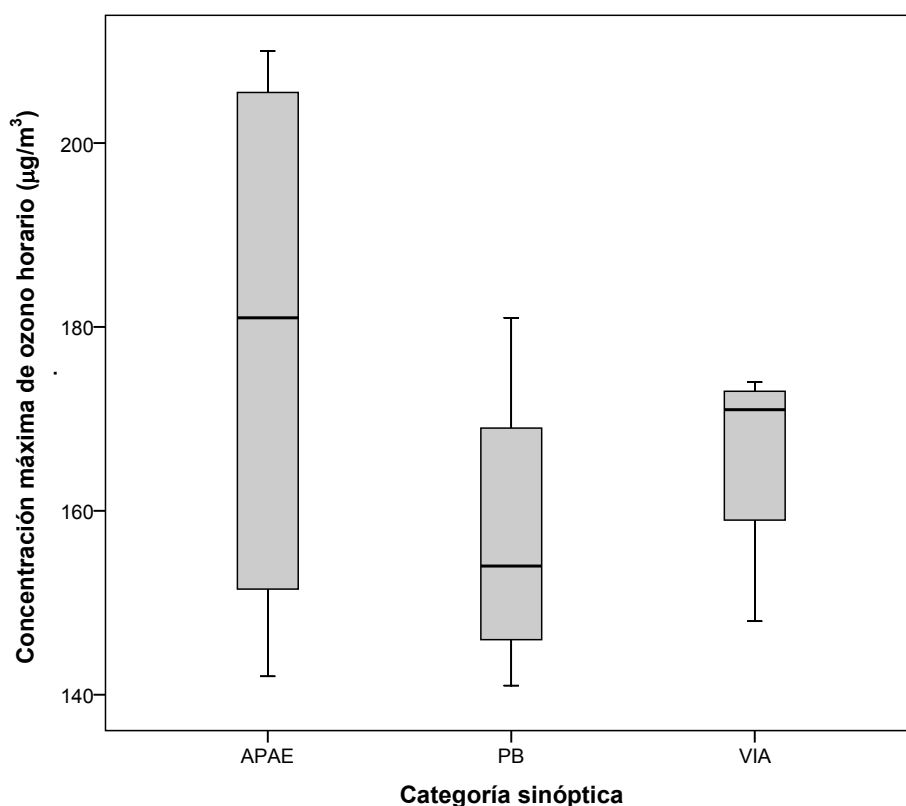


Figura 3.32: “Diagrama de caja mostrando la distribución de las concentraciones horarias máximas de ozono registradas para los episodios agrupados dentro de las tres categorías sinópticas más representativas. El gráfico muestra la mediana, los percentiles 25 y 75, el máximo y el mínimo de las concentraciones de ozono. Las siglas APAE, PB y VIA hacen referencia a los patrones sinópticos Altas presiones sobre el Atlántico y Europa, Pantano Barométrico y Vaguada ibero-africana, respectivamente”

En general, los resultados confirman el papel dominante de los anticiclones estacionarios y los flujos de componente Este, principalmente, y componente Sur, para producir picos de ozono mediante acción fotoquímica. De este modo, las altas concentraciones superficiales de ozono se asocian normalmente con días anticiclónicos en los cuales la tasa de insolación es elevada, la velocidad de viento es baja y los contaminantes precursores quedan confinados bajo una inversión de subsidencia:

- Tres cuartas partes de los 32 episodios identificados se agrupan dentro de tres patrones sinópticos característicos, según se observa en la figura 3.30: los tipos 9.I.M.e (“Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, APAE), 21.II (“Pantano barométrico”, PB) y 18.I.D (“Vaguada ibero-africana”, VIA), con el 40%, 19% y 16% de los episodios, respectivamente. Estas tres situaciones sinópticas están dominadas por el predominio de la masa de aire *continental tropical* (cT) durante el período estival. Esta masa de aire, según Font Tullot (Font Tullot, 1983), se manifiesta mejor definida por sus características en verano: gran sequedad, muy caliente y calmosa, lo cual coincide claramente con las condiciones típicas de formación de ozono (altas temperaturas, insolación elevada y gran estabilidad), favoreciendo además circulaciones locales de origen topográfico, como los citados vientos de valle o las brisas marinas. Este tipo de masa aérea, junto con la masa autóctona, es la que da lugar a las olas de calor en el litoral gallego, en ocasiones incrementadas debido al efecto catabático, causado por la Dorsal Gallega y las Sierras Orientales, y generalmente bajo circulaciones del Este, como corresponde a estos tres tipos sinópticos.
- Estos tres patrones sinópticos son los que conducen al registro de los máximos de ozono más elevados en la zona de estudio: los diez episodios con los mayores registros de ozono horario se agrupan dentro de estos tres tipos, destacando la situación sinóptica APAE, con seis de estos diez registros máximos, entre ellos las cuatro concentraciones de ozono más elevadas. La figura 3.32 recoge la distribución de las concentraciones máximas de ozono durante estos tres tipos dominantes, en las que se observa la mayor concentración alcanzada en el citado patrón APAE, cuya mediana es superior al valor umbral de información a la población ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), aunque modulada por un alto grado de dispersión, que en parte se explica por el mayor número de episodios de este tipo. Sin embargo, el patrón VIA con una mediana ligeramente inferior, presenta escasa dispersión, con lo cual su aparición supone, con una elevada probabilidad, un importante aumento de los niveles máximos de ozono. El patrón PB muestra mediana y media inferiores a los otros dos tipos anteriores, pero su elevada frecuencia de aparición hace que se deba considerar un patrón prioritario a la hora de analizar las situaciones altos niveles de ozono en el noroeste de Galicia: en este caso, las variables con mayor influencia en la elevación de las concentraciones son el estancamiento de las masas de aire, debido a la falta de intensidad de viento, que impide la dispersión de los contaminantes, y las altas temperaturas asociadas. Ambos factores inducen a considerar que los episodios desarrollados bajo estas condiciones sinópticas tienen un carácter fundamentalmente autóctono, debido a la generación local, frente al origen alóctono o mixto de los dos tipos analizados previamente. Entre los patrones menos frecuentes, destacan los altos niveles de concentración máxima de ozono alcanzados bajo la situación de “Anticiclón Británico-Escandinavo”, que origina flujo del Este sobre el Noroeste peninsular, facilitando la llegada de masas de ozono procedentes de la parte oriental de la Península, y la formación local de ozono, debido a la elevada insolación y las altas temperaturas que la acompañan.

Estos resultados son semejantes a los obtenidos por Fernández para la región de Madrid (Fernández García, 2001), y por Castell y cols. (Castell et al., 2004; Castell y Mantilla, 2003) para la vertiente mediterránea, según los cuales durante el verano se repiten de modo sistemático dos tipos de situaciones sinópticas: dorsal cálida sobre el Atlántico y parte de Europa, que se corresponde con un centro de altas presiones en superficie desencadenante de una gran estabilidad atmosférica, y formación de una baja térmica relativa sobre el interior de la Península, consecuencia del intenso calentamiento superficial que se produce bajo la influencia de una cresta norteafricana que canaliza aire tropical continental hacia el interior peninsular.

El resto de los episodios se desarrolla bajo tipos sinópticos muy variados, y están asociados a niveles inferiores de ozono, teniendo lugar la gran mayoría de ellos fuera del período estival, aunque el origen de las masas de aire suele ser, de nuevo, el interior peninsular (cT).

Estos tipos sinópticos peninsulares, que dan lugar a situaciones con altos niveles de ozono superficial en Galicia, forman parte en muchas ocasiones de patrones anticiclónicos globales, que afectan no sólo a Galicia y el resto de la península Ibérica, sino también a gran parte de Europa. Debido a ello, una proporción apreciable de los episodios detectados en el noroeste de Galicia coinciden con episodios en otras zonas peninsulares, como la Comunidad Valenciana (episodios nº 1, nº 14, nº 24, nº 25, nº 26, etc., Mantilla y Castell, 2002-2007), en otras regiones atlánticas, como Gran Bretaña (episodios nº 2, nº 6, nº 7, nº 9, nº 10, nº 11, nº 15, nº 18, nº 19, nº 20, nº 24, nº 25, nº 26, etc., Bower et al., 2004, 2005 y 2006; Loader y Lampert, 2005; Targa et al., 2006), o con episodios generalizados en la mayor parte de Europa (episodios nº 13, nº 15, nº 18, nº 19, nº 20, nº 26, etc., Fiala et al., 2002, 2003; Hjellbrekke y Solberg, 2004; Fjæraa, 2006; Fjæraa y Hjellbrekke, 2007; European Environment Agency, 2005, 2006, 2007, 2008), provocados por la extensión de las altas presiones y las condiciones anticiclónicas.

La clasificación sinóptica anterior intenta discriminar en lo posible las diferentes situaciones adversas que provocan el aumento de los niveles de ozono dentro de las condiciones sinópticas más genéricas que favorecen la inmisión de ozono, explicadas en el análisis preliminar de las condiciones sinópticas. Sin embargo, en muchas ocasiones la inclusión de un episodio bajo uno de los tipos anteriores resulta complicada, debido a la extrema variabilidad de la meteorología sinóptica, incluso dentro de un patrón general como el citado. Aún así, esta clasificación tiene valor como herramienta para poder catalogar de forma general condiciones sinópticas desfavorables para la inmisión de ozono troposférico en el noroeste peninsular, aunque tiene poca utilidad para análisis más detallados, que deben realizarse de forma particular para cada episodio, teniendo en cuenta no sólo las condiciones sinópticas en el día de máxima inmisión, sino también la evolución meteorológica a lo largo del período afectado. Esto se demostrará en el análisis individualizado de episodios, desarrollado en el apartado 3.6.3, de “Descripción de episodios representativos”, en el cual se observa la evolución de las condiciones sinópticas en algunos episodios.

### *3.5.3 Análisis de trayectorias*

El estudio de las situaciones sinópticas típicas es útil para describir la climatología de la región objeto de estudio y su relación con los cambios en la concentración de ozono. Sin embargo, para lograr un mayor conocimiento de las rutas de transporte atmosférico y de la dispersión de ozono se suelen utilizar patrones de flujo basados en el cálculo de retrotrayectorias. Por esta razón, en esta sección se describen las trayectorias seguidas por las masas de aire en los días centrales de cada episodio, para completar el análisis sinóptico y facilitar la interpretación de las medidas recogidas en las estaciones de calidad de aire, mediante el estudio del transporte atmosférico a larga distancia de ozono troposférico y posibles precursores primarios hacia la zona de estudio.

Los modelos de calidad de aire son una herramienta muy extendida para el estudio de relaciones fuente-receptor (Zannetti, 2001; Anastassopoulos et al., 2004; Pont et al., 2003; Ulke, 2004; García et al., 2005), pues aunque la mayoría incorporan los principales procesos asociados a los contaminantes atmosféricos, también pueden limitarse al cálculo de trayectorias. En este caso, el cálculo de las retrotrayectorias se ha llevado a cabo mediante el modelo NOAA HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), sistema desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA) y el Australia's Bureau of Meteorology (Draxler y Hess, 1997 y 1998). Se trata un sistema de modelización atmosférica ampliamente utilizado, que puede calcular recorridos de masas de aire de una región a otra, y demostrar así si el vector de transporte de contaminantes está realmente presente.

El modelo HYSPLIT está diseñado para soportar un amplio rango de simulaciones relacionadas con el transporte regional o de larga distancia, dispersión y deposición de contaminantes atmosféricos. El término “hybrid” en el acrónimo hace referencia al uso de dos sistemas de referencia diferentes, uno “móvil” de tipo lagrangiano, para cálculos de advección y difusión, y otro “fijo” de tipo euleriano, para cálculos de concentraciones. El modelo puede ser utilizado en un modo advectivo estándar, que produce trayectorias simples de parcelas de aire (retrotrayectorias o bien trayectorias hacia delante) a varios niveles, o bien en modo dispersivo, para obtener concentraciones y niveles de deposición superficial integrados sobre diferentes

capas y períodos de tiempo. Como el modelo no incorpora la generación de contaminantes secundarios como el ozono, el análisis de retrotrayectorias descrito en esta sección sólo ha hecho uso del módulo advectivo, al centrarse en la modelización de retrotrayectorias y no efectuar cálculos de concentraciones.

El cálculo de advección y dispersión se realiza mediante la aproximación de “puffs” o partículas en un entorno lagrangiano. El transporte y dispersión de un contaminante se calcula asumiendo la liberación de un único puff con una distribución particular o con la liberación de un determinado número de partículas de dispersión. El puff liberado se expande y posteriormente se divide en varios puffs cuando su tamaño excede la resolución de la malla meteorológica. El modelo HYSPLIT usa un modelo híbrido, utilizando distribución de puffs en dirección horizontal y dispersión de partículas en la vertical, a fin de alcanzar una mejor representación de las heterogeneidades en la distribución vertical de contaminantes. El cálculo de trayectorias se realiza mediante la integración de la posición de una masa de aire y su transporte por el campo tridimensional de viento. El modelo asume que el transporte y la dispersión tienen lugar en una capa bien mezclada, cuya extensión vertical se calcula en el modelo a partir de la temperatura potencial, obteniendo la altura de inversión en cada punto de la malla. Desplazándose hacia atrás en el tiempo, la retrotrayectoria resultante indica la llegada de una masa de aire a un receptor determinado en un instante dado, identificando así la posible región fuente.

Los métodos lagrangianos, que calculan las trayectorias de parcelas individuales de aire, constituyen un modo útil y natural de estudiar el transporte de sustancias antropogénicas. En el campo de la Meteorología, el adjetivo “lagrangiano” se refiere generalmente a estudios cinemáticos, lo cual implica el conocimiento del campo de velocidad de viento, obtenido en este caso a partir de reanálisis: los datos meteorológicos utilizados en este cálculo han sido obtenidos a partir de los reanálisis NCAR/NCEP (National Center for Atmospheric Research/National Center for Environmental Prediction, ambos de Estados Unidos) para el período 2002-2006, y los análisis GDAS (resultado de la salida del modelo NCEP Global Data Analysis System) para el año 2007, al no estar disponibles en la realización de las simulaciones los reanálisis NCEP/NCAR de este último año.

Los reanálisis NCAR/NCEP, disponibles cada 6 horas, presentan una resolución de 2.5° y algunos campos básicos que incluyen son las tres componentes del campo de vientos, la temperatura y la humedad relativa para 18 niveles, desde la superficie hasta los 10 hPa. Los análisis procedentes del GDAS se realizan cada 3 horas, con una resolución de 1.0° y campos meteorológicos básicos para el transporte y dispersión, desde la superficie hasta los 20 hPa en 23 niveles diferentes.

La obtención del origen de las masas de aire transportadas hacia la zona de estudio durante cada episodio se ha basado en el cálculo de retrotrayectorias. La duración de estas retrotrayectorias se ha establecido en 72 horas, para cubrir la península Ibérica y las áreas circundantes, de modo que tengan una longitud suficiente para identificar las zonas que actúan como fuentes potenciales, pues el ozono estival presenta una vida media de varios días (Seinfeld y Pandis, 1998). Se ha considerado como punto de destino de las trayectorias la estación que registraba la concentración máxima de ozono horario en cada episodio, y como fecha de llegada la hora universal en la que tenía lugar dicho evento máximo. La altura seleccionada para el cálculo de las trayectorias se ha fijado en 1500 metros en el punto de llegada, porque se ha considerado representativa de la parte superior de la capa de transporte diurna, y se suele tomar como frontera entre los vientos de superficie y los superiores (Katsoulis, 1999). Se han calculado las trayectorias a otras dos alturas (10 y 500 metros), para observar posibles diferencias entre ellas, pero la clasificación se ha establecido en función de las retrotrayectorias a 1500 metros, altura representativa de las masas de aire que recargan los estratos superiores de la atmósfera durante el día.

La calidad de aire de una región particular es función de las emisiones locales, pero también de las emisiones regionales y de las condiciones meteorológicas. Las tres condiciones que se deben cumplir simultáneamente para que la influencia de un área presente contribución negativa a la calidad del aire de una región vecina son:

- el área considerada como origen presenta un comportamiento de fuente de contaminantes o precursores de contaminación atmosférica
- el recorrido de las masas de aire recoge los contaminantes de la región fuente y los transporta al área de estudio en un período de tiempo lo suficientemente corto para que los contaminantes estén todavía presentes y los precursores activos
- antes de alcanzar la región destino, la masa de aire contaminada debe situarse a una altura tal que pueda afectar a la calidad de aire local o bien depositar los contaminantes, de modo que la región de estudio se comporte como un sumidero para los contaminantes atmosféricos

Teniendo en cuenta estas tres características, los episodios han sido clasificados en función del recorrido y origen de las trayectorias calculadas para cada uno de ellos, indicando la procedencia de las masas de aire que afectan al norte de Galicia, de acuerdo con una doble aproximación, en función de la escala:

#### a) Escala regional

La mayoría de las simulaciones de retrotrayectorias indican que los recorridos de las masas de aire presentan cambios de dirección significativos durante el período de 72 horas seleccionado. Por tanto, para facilitar la caracterización de la dirección de llegada de las masas de aire se ha optado por discretizar el recorrido total de dichas masas en subtrayectorias, estableciendo como dirección de procedencia la que presentan durante la subtrayectoria correspondiente a las últimas 36 - 44 horas previas a su llegada (Anastassopoulos et al., 2004). La determinación de esta dirección se llevó a cabo mediante un sencillo método gráfico basado en una “brújula” superpuesta al gráfico de simulación, que permite conocer los octantes geográficos (sectores de 45°) recorridos por el flujo atmosférico durante ese subperíodo, como se muestra en la figura 3.33.

La ventaja de este método de clasificación es que permite relacionar los valores de inmisión registrados en la zona de estudio con medidas de estaciones en zonas limítrofes más o menos próximas (regiones limítrofes con Galicia, como Asturias, Norte de Portugal, Castilla-León), además de tener asociado un error de precisión ligeramente menor, dada su mayor proximidad al punto de destino, ya que los errores de modelización se acumulan al aumentar el tiempo de simulación (Rolph y Draxler, 1990). Por otra parte, también facilita su relación con la clasificación sinóptica de cada episodio, pues para desarrollar ésta se había considerado únicamente el día en que se alcanzaba el máximo horario, como ya se ha explicado previamente: esto permite asociar direcciones de flujo a cada situación sinóptica de modo sencillo, y viceversa, características meteorológicas a cada dirección de trayectoria.

La decisión de escoger como período indicativo de dirección las últimas 36-44 horas está motivado por la necesidad de incluir la jornada en que se alcanza el máximo (generalmente entre las 12 UTC y las 20 UTC en casi el 85% de los casos), y la jornada precedente, en la que previsiblemente se formaría ozono durante el período diurno en las zonas limítrofes. La selección de un menor período implicaría solamente la posibilidad de considerar la formación local (8-12 horas con radiación solar en el propio día, antes de alcanzar el máximo) y el transporte nocturno (generalmente con bajas velocidades de viento), con lo cual la influencia del transporte desde zonas limítrofes relativamente próximas quedaría apantallado, dado que en general la intensidad de viento durante los episodios de ozono es muy débil.

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 15 UTC 21 Mar 03  
CDC1 Meteorological Data

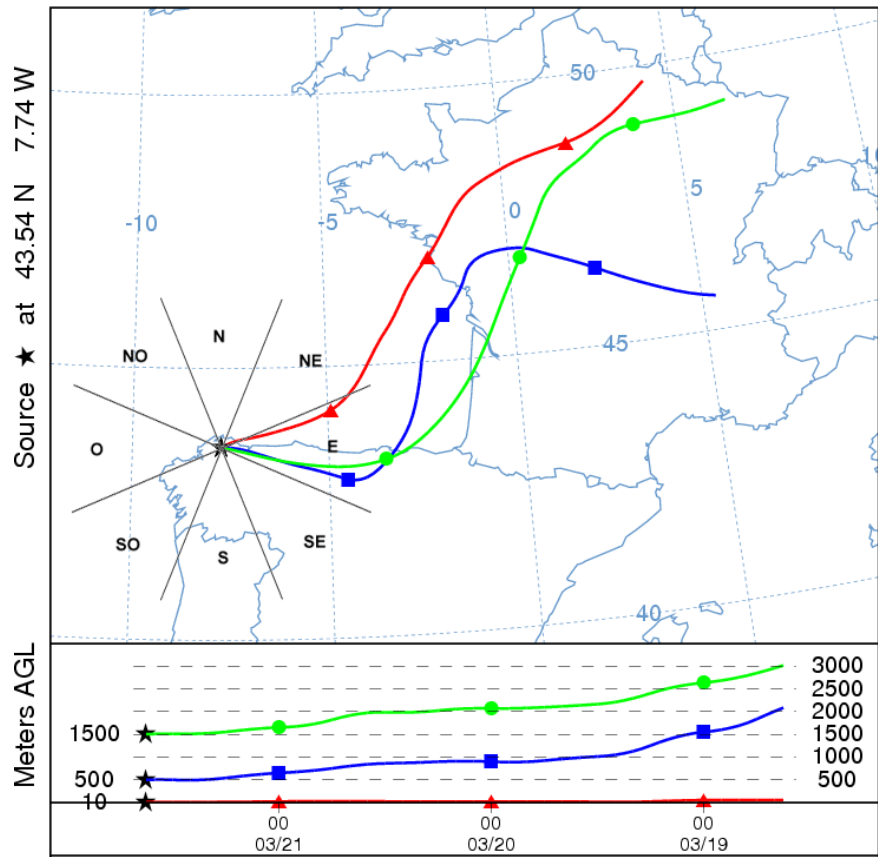


Figura 3.33: "Representación gráfica de la retrotrayectoria de 72 horas de duración simulada con el modelo NOAA-HYSPLIT para el episodio nº 6, en la que se puede observar el método gráfico empleado para el cálculo de la dirección de llegada (sector Este en el ejemplo) a la estación seleccionada"

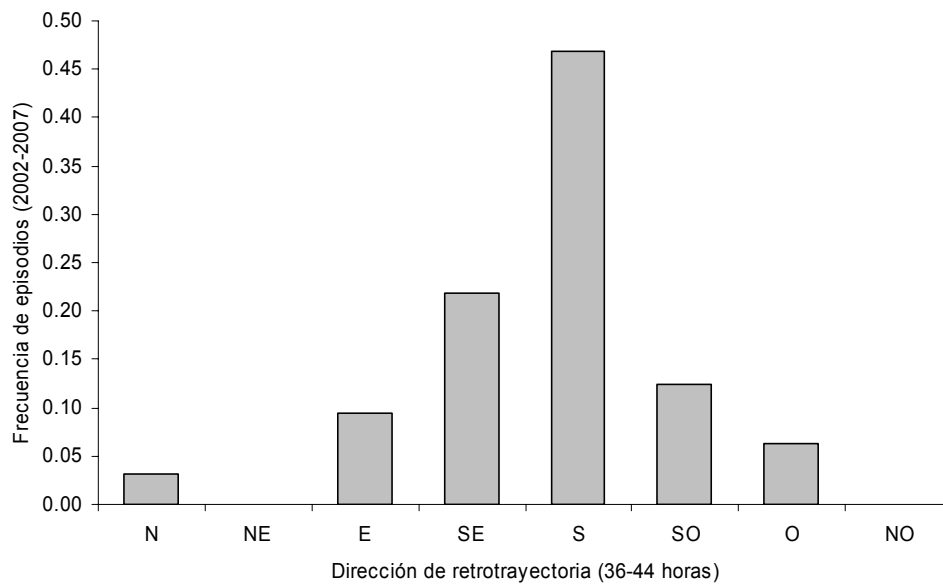


Figura 3.34: "Distribución de episodios en el período Julio 2002 – Agosto 2007 agrupados por sector geográfico de llegada de las retrotrayectorias simuladas a 1500 m de altura, considerando únicamente las últimas 36-44 horas del episodio"

Episodio	Fecha	Inmisión ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) / Estación	Dirección de llegada (sector)	Origen	Situación sinóptica
Año 2002					
14-23 Julio (1)	18 Julio	201 (B1)	SE-S- <b>SO</b>	Franco-cantábrico	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
11-17 Agosto (2)	14 Agosto	142 (C9)	S- <b>SO</b>	Local (Atlántico Norte)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
23-04 Septiembre (3)	02 Septiembre	157 (F2)	SE- <b>S</b>	Mediterráneo-Peninsular	Pantano barométrico
09-18 Septiembre (4)	14 Septiembre	136 (B1)	S- <b>SE</b>	Atlántico Sur-Portugués	Depresión del golfo de Cádiz
21-30 Septiembre (5)	27 Septiembre	145 (F2)	E- <b>SE</b>	Franco-cantábrico	Anticiclón centroeuropeo
Año 2003					
16-24 Marzo (6)	21 Marzo	148 (B2)	NE- <b>E</b>	Franco-cantábrico	Anticiclón británico-escandinavo
26-01 Junio (7)	29 Mayo	161 (B2)	SE- <b>S</b>	Franco-cantábrico	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
18-24 Junio (8)	20 Junio	210 (B1)	<b>SE</b> -S	Mediterráneo-Peninsular	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
06-13 Julio (9)	08 Julio	139 (C9)	NO- <b>O</b>	Local (Atlántico Norte)	Anticiclón de las Azores y depresión térmica peninsular
30-16 Agosto (10)	07 Agosto	174 (C9)	<b>S</b>	Local (Portugal)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
12-22 Septiembre (11)	16 Septiembre	193 (G2)	SE- <b>S</b>	Local (Francia)	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
Año 2004					
14-22 Mayo (12)	19 Mayo	170 (F2)	E- <b>SE</b>	Mediterráneo-Peninsular	Vaguada ibero-africana
31-11 Junio (13)	05 Junio	156 (B1)	<b>E</b> -SE	Británico	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
12-19 Junio (14)	17 Junio	196 (B2)	NE- <b>E</b> -SE-S-SO	Británico	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
28-05 Agosto (15)	01 Agosto	181 (B2)	SE- <b>S</b>	Mediterráneo-Peninsular	Pantano barométrico
Año 2005					
11-17 Marzo (16)	12 Marzo	144 (F2)	<b>S</b>	Atlántico Sur-Portugués	Circulación ondulada a bajas latitudes
27-01 Mayo (17)	30 Abril	141 (B2)	SE- <b>S</b>	Mediterráneo-Peninsular	Pantano barométrico
22-28 Mayo (18)	26 Mayo	167 (C9)	<b>S</b>	Atlántico Sur-Portugués	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
16-25 Junio (19)	22 Junio	158 (F2)	<b>S</b> -SO	Atlántico Sur-Portugués	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
09-15 Julio (20)	13 Julio	174 (G2)	E- <b>SE</b>	Franco-cantábrico	Vaguada ibero-africana
29-04 Septiembre (21)	30 Agosto	153 (C9)	<b>S</b> -SO	Atlántico Sur-Portugués	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa



13-23 Septiembre (22)	15 Septiembre	148 (B2)	<b>SE-S-SO-O</b>	Franco-cantábrico	Vaguada ibero-africana
04-11 Octubre (23)	07 Octubre	169 (B2)	<b>SO</b>	Local (Galicia)	Anticiclón británico-escandinavo
Año 2006					
03-10 Junio (24)	07 Junio	179 (C9)	<b>S</b>	Atlántico Sur-Portugués	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa
30-11 Julio (25)	01 Julio	151 (C9)	<b>S</b>	Mediterráneo-Peninsular	Pantano barométrico
13-26 Julio (26)	17 Julio	172 (B2)	<b>S</b>	Atlántico Sur-Portugués	Vaguada ibero-africana
29-03 Septiembre (27)	31 Agosto	155 (C9)	<b>N-S-SO</b>	Local (Atlántico Norte)	Vaguada ibero-africana
03-09 Septiembre (28)	06 Septiembre	160 (C9)	<b>O-SO</b>	Atlántico Sur-Portugués	Pantano barométrico
Año 2007					
16-25 Abril (29)	21 Abril	155 (B2)	<b>SE</b>	Local (Meseta)	Depresión del golfo de Cádiz
02-10 Mayo (30)	06 Mayo	138 (B2)	<b>NO-N</b>	Atlántico Norte	Anticiclón atlántico-mediterráneo
05-12 Junio (31)	07 Junio	135 (C9)	<b>SE-S</b>	Mediterráneo-Peninsular	Pantano barométrico
01-06 Agosto (32)	04 Agosto	166 (B1)	<b>S-SO</b>	Atlántico Sur-Portugués	Altas presiones sobre el Atlántico y Europa

Tabla 3.9: Clasificación de trayectorias de flujos de aire en los episodios con altos niveles de ozono troposférico registrados en el noroeste de Galicia durante el período Julio 2002 - Agosto 2007, atendiendo a su origen y dirección de llegada. La clasificación se ha basado en retro-trayectorias de 72 horas de duración, calculadas a 1500 m de altura sobre el punto de destino (noroeste de Galicia). El sector geográfico que indica la dirección de llegada predominante en las 36-44 horas previas a su llegada está resaltado en negrita."

En resumen, la clasificación de trayectorias según su dirección de llegada (tabla 3.9) divide a éstas en ocho sectores geográficos de 45° de amplitud, en función de las 36-44 horas previas a su llegada. La figura 3.34 muestra la distribución de frecuencias por sectores calculada para las retrotrayectorias correspondientes a los 32 episodios identificados, a partir de las subtrayectorias seleccionadas.

Se observa un claro predominio de la componente Sur, con un 47% de situaciones de S, seguida de los sectores SE y SO, con un 22% y 13% de casos, respectivamente. Como se esperaba, estos resultados son coherentes con la clasificación de situaciones sinópticas realizada previamente, en las que dominaban configuraciones con flujos de componente Sur sobre el noroeste peninsular (“Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, caracterizadas por la masa “Ibérica cálida”, procedente del centro peninsular, “Vaguada Ibero-Africana” y “Pantano barométrico”, con masas “marítimo tropicales”, que proceden del Atlántico). Según estos sectores de llegada, las principales zonas contribuyentes a los niveles de ozono en el norte de Galicia serían la región norte de Portugal, las provincias occidentales de Castilla-León (León y Zamora) y la costa sur de Galicia (litoral de las Rías Baixas, en Pontevedra), todas ellas con una importante producción de precursores de ozono, como se puede observar en la figura 3.35, que recoge las emisiones de NO<sub>x</sub> y compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOCs) en la península Ibérica en el año 2005 de acuerdo con el inventario EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme, 2010).

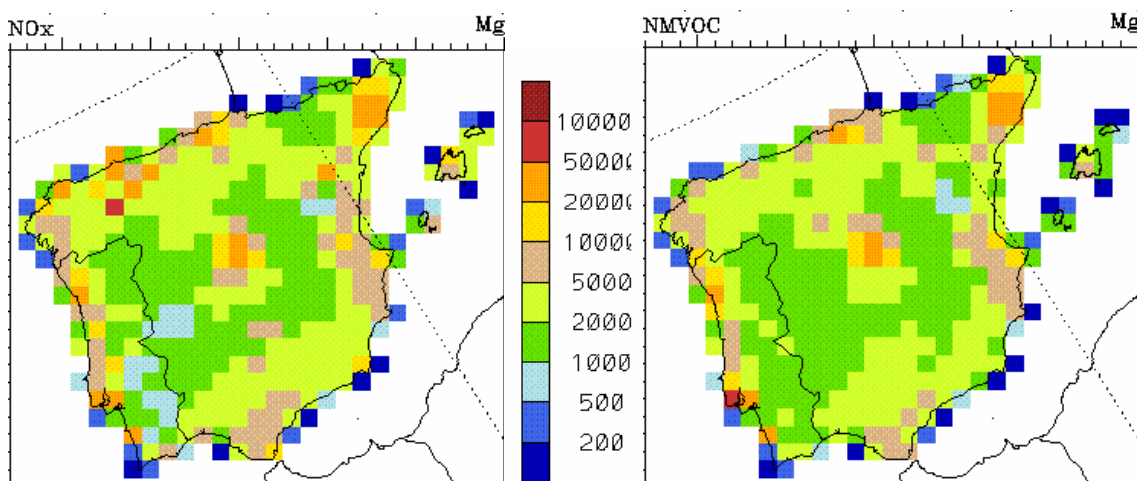


Figura 3.35: “Emisiones de NO<sub>x</sub> (izquierda) y NMVOCs o compuestos orgánicos volátiles no metánicos de origen industrial (derecha) en Tm/año para la península Ibérica durante el año 2005. Destacan las importantes emisiones de NO<sub>x</sub> en las áreas limítrofes con Galicia (la costa cantábrica, el litoral norte de Portugal y el noroeste de la Submeseta Norte), así como las registradas en el tercio norte galaico. Adaptado de European Monitoring and Evaluation Programme, 2010”

b) Escala sinóptica

La dirección de las masas de aire no puede caracterizar por sí sola la influencia del transporte a larga distancia sobre los niveles de inmisión de ozono superficial medidos en la zona de estudio, debido a la pérdida de los recorridos y cambios de dirección asociados en un horizonte temporal superior a las 36-44 horas y a que la banda de tolerancia de 45° elegida para cada sector cubre un área geográfica que se va incrementando progresivamente a medida que aumenta la distancia al punto de llegada. Esto provoca que el análisis de la influencia del transporte alóctono basado únicamente en la dirección sea demasiado general.

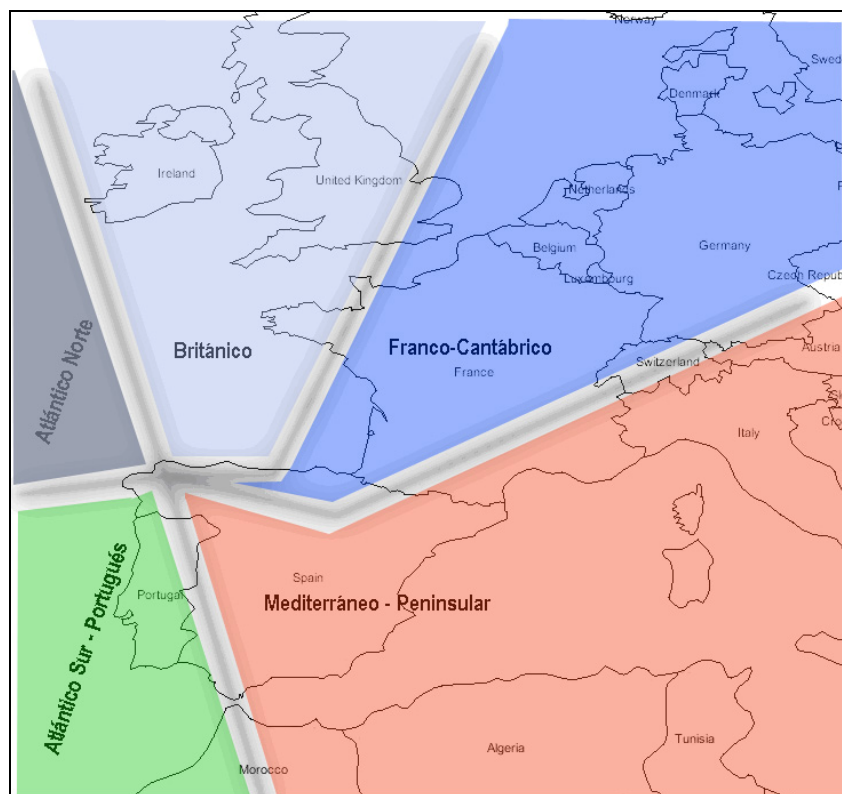


Figura 3.36: "Clasificación de las posibles rutas de transporte de ozono troposférico y precursores hacia el noroeste de Galicia, basada en retrotrayectorias a 1500 m de altura y una duración establecida de 72 horas. Se han considerado cinco regiones diferentes atendiendo al origen y recorrido de las trayectorias correspondientes a los 32 episodios analizados: sector Atlántico Sur-Portugués, sector Mediterráneo-Peninsular, sector Franco-Cantábrico, sector Británico y sector Atlántico Norte"

Para solventar esta carencia, se ha efectuado un análisis de retrotrayectorias desde un punto de vista global (García et al., 2005), considerando una escala temporal superior (retrotrayectorias completas de 72 horas, asociadas por tanto a un mayor recorrido espacial, a escala sinóptica), para establecer la relación entre la máxima concentración de ozono en cada episodio y el origen de la retrotrayectoria. Para ello se han distinguido seis posibles rutas de transporte hacia el norte de Galicia, teniendo en cuenta el origen de las mismas y los regiones atravesadas, de las cuales cinco se muestran en el mapa de la figura 3.36. El último conjunto de retrotrayectorias considerado para completar los seis tipos citados agruparía a las retrotrayectorias con origen local, aquellas que efectúan una importante parte de su recorrido sobre Galicia, según se concretará más adelante.

La figura 3.37 recoge un ejemplo representativo de cada uno de los seis tipos de retrotrayectorias identificadas ("Atlántico Norte", "Británico", "Franco-Cantábrico", "Mediterráneo-Peninsular", "Atlántico Sur-Portugués" y "Local"), describiéndose a continuación las principales características asociadas a cada una de ellas.

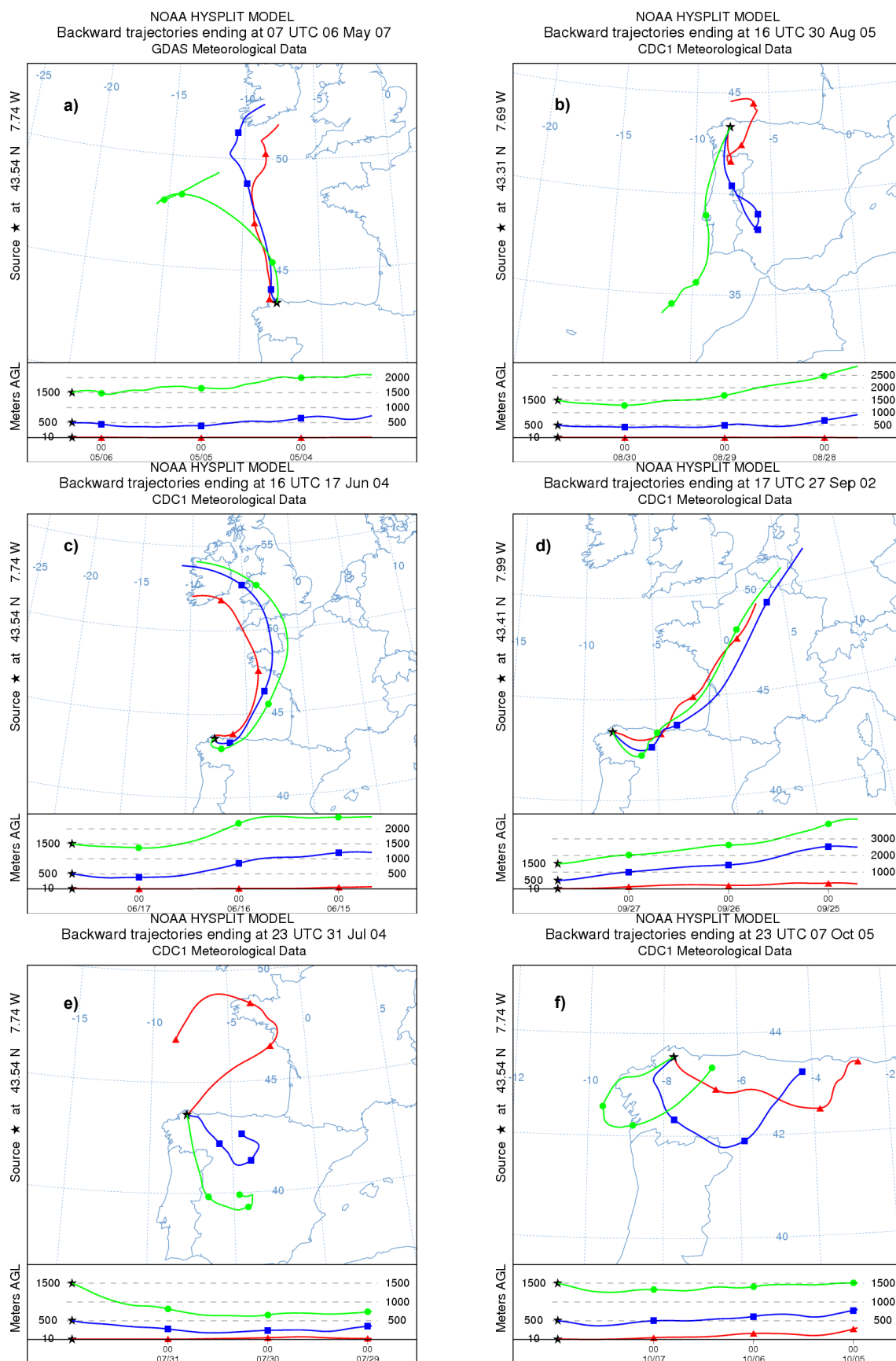


Figura 3.37: “Modelos representativos de las seis rutas de transporte de ozono troposférico y precursores hacia el noroeste de Galicia, basada en retrotrayectorias a 1500 m de altura y una duración establecida de 72 horas: a) ‘Atlántico Norte’, b) ‘Atlántico Sur-Portugués’, c) ‘Británico’, d) ‘Franco-Cantábrico’, e) ‘Mediterráneo-Peninsular’ y f) ‘Local’ ”

### 1) Atlántico Norte

Una única trayectoria, con origen al noroeste de Galicia, sobre el océano Atlántico, que efectúa todo su recorrido sobre el mar, entrando en Galicia en dirección norte, sin efectuar cambios de dirección acusados durante su desplazamiento (figura 3.37a).

### 2) Atlántico Sur-Portugués

Este grupo se caracteriza por presentar el origen de las trayectorias al sur de Galicia, bien sobre el noreste de Portugal (episodios nº 16 y 26) o bien sobre el Atlántico Sur, al oeste de las costas de Marruecos (episodios nº 4, 19, 21, 28 y 32). En el primer caso, las masas de aire se originan sobre el noreste de Portugal, y alcanzan Galicia tras efectuar un corto recorrido en dirección S, mientras en el segundo caso llegan al noroeste peninsular en dirección S-SO, después de recorrer toda la costa occidental de Portugal (figura 3.37b). Las masas de aire que llegan al noroeste peninsular siguiendo esta trayectoria tienen su origen 72 horas antes en la costa norte de África o al suroeste de Portugal, continuando su ascenso en dirección norte por el litoral occidental luso o por el centro-este de Portugal, respectivamente. En el primer caso suelen entrar en Galicia desde el SO-S, y en el caso de recorrido interior, en dirección S-SE.

Se han incluido en este grupo un par de episodios con recorrido de trayectorias muy similares (episodios nº 18 y 24), que se originan 72 horas antes al norte de África (sur de Marruecos), y ascienden en dirección norte atravesando Portugal, hasta alcanzar el noroeste gallego.

Los fenómenos de subsidencia a lo largo de estos episodios son comunes, salvo en este último grupo de origen africano, con una convección muy marcada.

Por último, debe destacarse las diferentes direcciones en las trayectorias seguidas por las masas de aire a 10, 500 y 1500 m, con variaciones de hasta 90° entre los 10 y los 1500 metros de altura. Estos cambios observados en las trayectorias con la altura son debidos probablemente al débil forzamiento sinóptico que caracteriza a estos episodios, que incrementa la influencia de fenómenos regionales, como las bajas térmicas, que interfieren con la circulación sinóptica general.

### 3) Británico

Poco comunes en los episodios con altos niveles de ozono en el noroeste peninsular, estas trayectorias semicirculares tienen su origen al norte de la Comunidad Gallega, sobre las costas septentrionales de Irlanda, y recorren el suroeste de Inglaterra, atravesando el Canal de la Mancha hasta rozar Normandía y la Bretaña francesa; posteriormente rolan al noroeste, cruzando el Golfo de Vizcaya y entrando en la península Ibérica por el centro de la costa cantábrica, hasta alcanzar Galicia en dirección E-SE (figura 3.37c).

Se registra un fenómeno de subsidencia a lo largo de este tipo de trayectorias, pues las masas de aire van descendiendo progresivamente en altura hasta alcanzar los 1500 m al penetrar en la Península. Una explicación plausible de este proceso es el reforzamiento de la situación anticiclónica a medida que se acercan los días centrales del episodio, con lo cual la subsidencia anticiclónica se ve favorecida.

### 4) Franco-Cantábrico

Las masas de aire parten del centro o norte de Francia, país que cruzan en dirección suroeste, hasta entrar en la Península por el este del litoral cantábrico o incluso por los Pirineos. Una vez en el interior peninsular giran al este, entrando en Galicia en dirección E o SE, en función de la distancia que hayan recorrido hacia el centro peninsular. Son trayectorias muy similares a las anteriores, clasificadas como de origen "británico", diferenciándose fundamentalmente en su origen (norte de Francia en este caso, e Irlanda, en el caso anterior), y en el recorrido continental, mayor en las trayectorias clasificadas como de origen "franco-cantábrico" (figura 3.37d).

El fenómeno de subsidencia citado se repite de nuevo, como en los casos de origen británico, disminuyendo la altura del flujo de aire que alcanza los 1500 m sobre la Península desde los 3000 m, en general. Este proceso favorece la formación de inversiones de subsidencia, que confinan los contaminantes en una estrecha capa, aumentando los niveles de contaminación en general, y los de ozono superficial en particular. El radiosondeo mostrado en la figura 3.38 constituye un ejemplo de la generación de inversiones de subsidencia anticiclónica durante un episodio de este tipo, el episodio nº 5, indicando la presencia de aire seco en altura.

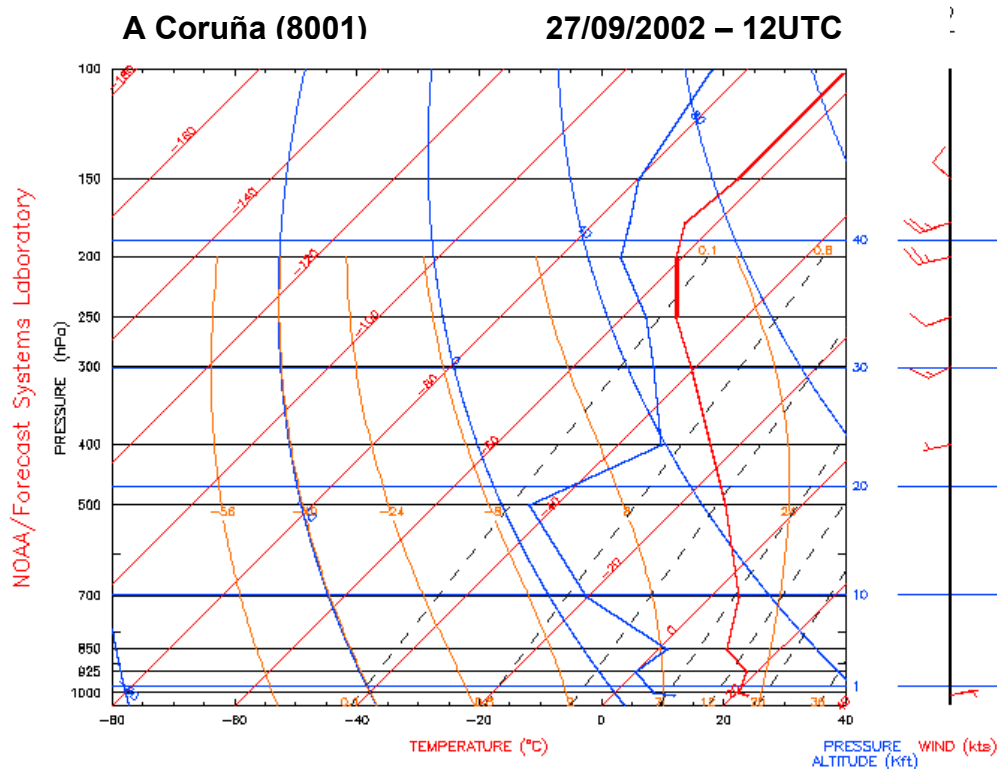


Figura 3.38: “Diagrama skew-T correspondiente al radiosondeo lanzado sobre A Coruña a las 12 UTC del día 27 de Septiembre de 2002, jornada central del episodio nº 5 (21-30 Septiembre de 2002). Se observa la inversión de subsidencia a partir del nivel de 850 mb, con aire más seco en altura, según indica la acusada disminución de la temperatura de rocío (línea azul) y el ligero aumento de la temperatura. Adaptado de National Oceanic and Atmospheric Administration (2008)”

La causa de esta subsidencia peninsular generalizada está en el reforzamiento progresivo de la influencia anticiclónica sobre la Península, a medida que las altas presiones se desplazan hacia desde las Azores hacia el norte de Galicia, quedando situadas sobre las Islas Británicas o Centroeuropa.

##### 5) Mediterráneo-Peninsular

La mayoría de estas trayectorias presentan un recorrido muy característico sobre la península Ibérica, atravesándola en dirección SE, hasta alcanzar el norte de Portugal y entrar en Galicia desde el sur. El origen de estos flujos suele situarse al sur del Sistema Central, en la Submeseta Sur peninsular (figura 3.37e), o bien en el litoral sur de Levante español.

Asociado a este grupo de trayectorias está un intenso fenómeno convectivo a medida que los flujos se aproximan al noroeste peninsular, debido a la situación sinóptica de carácter anticiclónico dominada por las configuraciones de pantano barométrico o bajas presiones de origen térmico (episodios nº 3, 15, 17, 25 y 31). En este grupo también existen

discrepancias importantes entre las trayectorias calculadas a diferentes alturas, como se puede observar en la figura 3.37e, de nuevo provocadas por la debilidad de la circulación sinóptica.

Un número menor de trayectorias englobadas en este grupo (episodios nº 8 y 12) tiene su inicio más al norte, a la altura de los Pirineos, estando asociado su recorrido a subsidencia de las masas de aire.

## 6) Local

Se ha establecido que una trayectoria se considera de origen local si no abandona Galicia durante el período de tiempo comprendido entre el día en que se alcanza el máximo y la jornada precedente a éste (es decir, la trayectoria permanece sobre Galicia durante, como mínimo, las 36 horas previas al registro máximo observado). Aún así, se indica la procedencia del flujo durante las horas restantes, previas a estas 36 horas últimas, para conocer el origen inicial de los flujos atmosféricos, que puede ser muy variado (Atlántico Norte, Portugal, la Submeseta Norte, etc.).

Por tanto, las masas de aire se mantienen confinadas en el interior de Galicia o en sus proximidades, viajando cortas distancias (figura 3.37f). Se suelen caracterizar por la presencia de altas temperaturas y bajas intensidades de viento, con lo cual se favorece la generación local de ozono a partir de precursores locales y la acumulación de ozono debido a procesos de recirculación atmosférica (condiciones de gran estabilidad) y fenómenos locales (brisas marinas, vientos de valle, etc.). Estas brisas marinas son las que favorecen que la dirección predominante de las trayectorias en este grupo sea S-SO (aunque muy variable en función del origen), al no existir un viento sinóptico claramente dominante

La subsidencia no es generalizada en los episodios de origen local, salvo en los que presentan el inicio de la retrotrayectoria al norte de Galicia, sobre el océano Atlántico.

Esta clasificación aparece reseñada en la tabla 3.9, estableciendo el área de origen de la trayectoria global asociada a cada episodio, así como los territorios recorridos en su desplazamiento, de acuerdo con las seis rutas descritas anteriormente.

La figura 3.39 muestra la distribución porcentual de los 32 episodios analizados según el origen y recorrido de las retrotrayectorias, de acuerdo con la clasificación a escala sinóptica descrita previamente, mientras la figura 3.40 presenta las medias de los máximos episódicos obtenidas para cada origen, revelando cierta influencia de los movimientos de las masas de aire en los valores de inmisión de ozono.

Del análisis de la figura 3.39 puede concluirse que dominan los episodios que presentan su origen en Portugal o Atlántico Sur, con un 28% de los casos, seguidos por los de origen mediterráneo - peninsular y los de origen local, ambos con un 22%, situándose a muy corta distancia aquellos episodios con trayectorias desde el centro de Francia, recorriendo la Cornisa Cantábrica, con el 19% del total. Los episodios con trayectorias más septentrionales (Atlántico Norte o Islas Británicas) registran una frecuencia claramente inferior. De acuerdo con ello, se pueden considerar tres rutas como principales vías de transporte de ozono y precursores hacia el noroeste peninsular, con efecto relevante en el incremento de los niveles de ozono troposférico: una ruta desde el norte de África y/o el sur de Portugal, otra ruta procedente de Centroeuropa (siendo Francia la región de paso) y la propia ruta peninsular, con su origen en el litoral mediterráneo o en la propia Submeseta Sur. Por último, se debe incluir la generación local de ozono (en la propia Comunidad Autónoma), con una frecuencia similar a las otras tres vías.

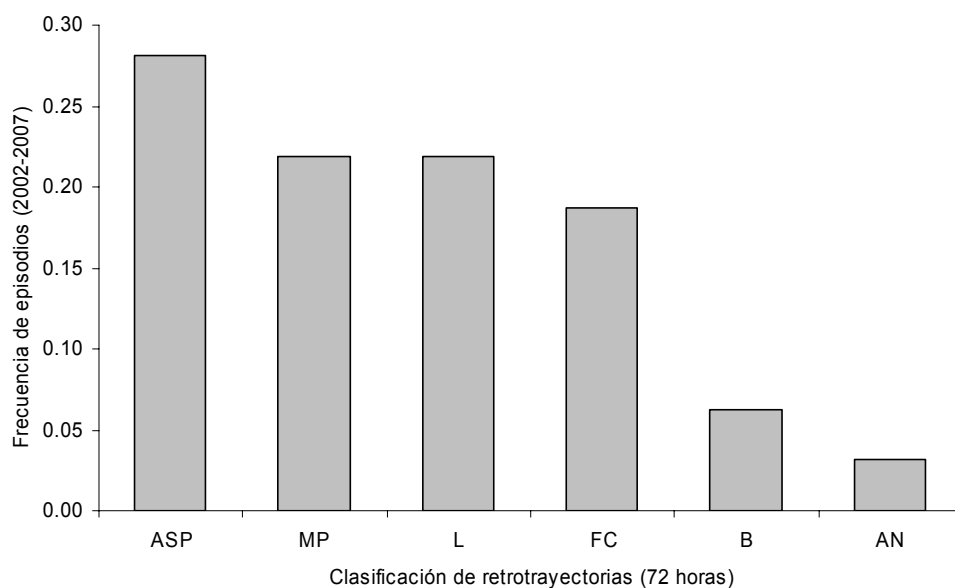


Figura 3.39: “Distribución de episodios en el período Julio 2002 – Agosto 2007 agrupados por origen y recorrido de las retrotrayectorias simuladas a 1500 m de altura, de 72 horas de duración. Las siglas ASP indican ‘Atlántico Sur-Portugués’, MP ‘Mediterráneo-Peninsular’, L ‘Local’, FC ‘Franco-Cantábrico’, AN ‘Atlántico Norte’ y B, ‘Británico’ ”

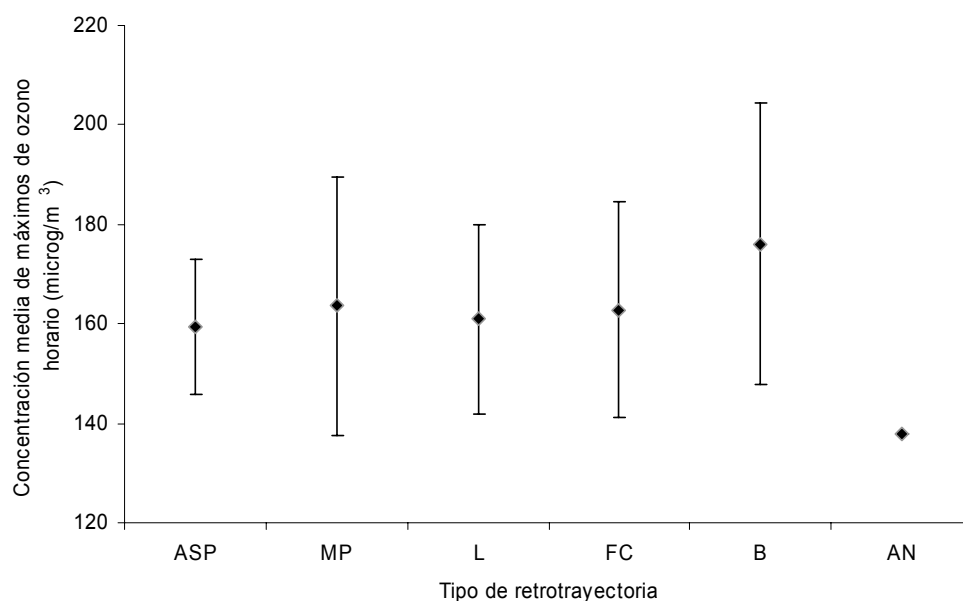


Figura 3.40: “Valores medios y desviación típica de los máximos diarios de ozono en los episodios asociados bajo cada origen y dirección de retrotrayectoria. Las siglas ASP indican ‘Atlántico Sur-Portugués’, MP ‘Mediterráneo-Peninsular’, L ‘Local’, FC ‘Franco-Cantábrico’, AN ‘Atlántico Norte’ y B, ‘Británico’ ”

La baja frecuencia de los episodios con origen al oeste o al norte de la Comunidad Gallega se puede explicar por las condiciones meteorológicas poco favorables para la formación de ozono (los flujos del Norte sobre el noroeste peninsular suelen estar asociados a descensos térmicos, debido a las masas de origen ártico o polar, y los flujos del Oeste a temperaturas suaves, incluso con precipitaciones), así que es previsible que los niveles de ozono en estos episodios con trayectorias septentrionales u occidentales tengan un origen claramente alóctono, y sean debidos al transporte de ozono desde latitudes superiores. Por otra parte, otros estudios



(García et al., 2005) confirman que, a pesar de la relativa abundancia durante el año de la advección de las masas marítimas del Atlántico Oeste en la península Ibérica, la concentración media de máximos diarios de ozono asociada a ellas no es demasiado relevante, indicando que no atraviesan zonas con una elevado nivel de contaminantes. Esta situación se repite en este análisis, ya que la trayectoria catalogada como “Atlántico Norte” origina un episodio con un nivel máximo de ozono de  $138.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , unos  $22\text{-}25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por debajo de los valores registrados en los episodios originados por otras trayectorias (figura 3.40), como se analizará posteriormente.

El resto de episodios, asociados a los cuatro orígenes anteriormente citados, se corresponden con situaciones sinópticas más favorables, pues los flujos de componente E, SE o S son situaciones clásicas de tiempo soleado y despejado en Galicia, acompañado de altas temperaturas, favoreciendo las reacciones fotoquímicas, al igual que la presencia de flujos de aire muy debilitados, responsables del origen local.

Esta distribución de trayectorias de 72 horas no se corresponde con la presentada en la figura 3.34, donde casi la mitad de los episodios registran flujos de dirección Sur en las últimas 36-44 horas; ello se debe a los giros y cambios de dirección efectuados por las masas de aire al acercarse a Galicia, y es una muestra más de la necesidad de realizar un análisis de trayectorias en dos niveles (regional y sinóptico), atendiendo a las regiones limítrofes (36-44 horas) y a la extensión de la trayectoria completa (3 días).

Los valores medios de los máximos episódicos de ozono relacionados con cada grupo de trayectorias (figura 3.40) no presentan diferencias significativas, según la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ( $\chi^2_5 = 2.91$ ,  $p = 0.71$ ), con valores muy próximos para los cuatro orígenes distintos ( $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para “Atlántico Sur-Portugal”,  $161 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para origen local,  $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para “Franco-Cantábrico” y  $164 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para origen “Mediterráneo-Peninsular”, siendo  $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$  la media de los 32 episodios analizados). Una explicación plausible para esta semejanza de valores máximos podría encontrarse en el dominio de la formación fotoquímica sobre la propia Península frente al transporte alóctono transfronterizo, ya que, salvo las trayectorias locales (circunscritas a Galicia), las trayectorias encuadradas en los otros tres grupos realizan un importante recorrido sobre el territorio peninsular, favoreciendo así las reacciones fotoquímicas de formación de ozono sobre la Península. Esto induce a suponer que la mayor contribución de ozono en los episodios del noroeste gallego procede de la propia Península, y no directamente de otras zonas limítrofes (Centroeuropa, norte de África, océano Atlántico), cuyo efecto sería una ligera modulación sobre estos valores máximos episódicos, ya que no se ha observado una desviación significativa entre el valor medio asociado a la totalidad de episodios y el de cada uno de estos cuatro grupos.

De igual modo, otros estudios previos han obtenido resultados que confirman la importante influencia de trayectorias de tipo local-peninsular afectando a otras localizaciones de la Península (García et al., 2005; Gangoiti et al., 2001, 2002): por tanto, la situación geográfica marginal de Galicia en el contexto de la península Ibérica provoca que la influencia del transporte alóctono de ozono (transfronterizo, desde Centroeuropa, África o el Mediterráneo) sea de tipo indirecto, debida a la modificación previa sufrida por las masas de aire durante su transporte sobre la Península, y a la recogida de precursores y ozono formado en la propia región peninsular, cuyo efecto final se manifiesta en una homogeneización de los niveles de ozono, independientemente de su origen inicial. Considerando las 36-44 horas previas al máximo registro episódico de ozono, la presencia mayoritaria de la citada componente Sur (común en más del 80% de los casos) que caracteriza la llegada de la mayoría de estas masas de aire, independientemente de su origen centroeuropeo, mediterráneo o africano, es otro argumento que apoya esta hipótesis.

Una situación claramente diferente se plantea en el caso de las trayectorias clasificadas como de origen “Británico”, con unos valores máximos sensiblemente superiores ( $176 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sobre  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por encima de la media de máximos episódicos), que indican una clara influencia alóctona en los niveles de ozono registrados en el noroeste de la Comunidad Autónoma Gallega (sin descartar las importantes contribuciones autóctonas), porque el recorrido sobre la Península de las masas que siguen esta trayectoria es muy corto (apenas 24 horas). Por ello, la contribución de ozono de procedencia “británica” se puede considerar importante en aquellos

escasos episodios que presentan este origen. De todos modos, los resultados asociados a las trayectorias con origen en las Islas Británicas deben analizarse con ciertas precauciones, dada su escasa representatividad estadística derivada del pequeño porcentaje de casos analizados con este origen. La situación es similar a las trayectorias con origen en el “Atlántico Norte”, con un número igualmente reducido de casos, y que presentaban unos valores máximos notablemente inferiores al resto de grupos ( $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), debido a su recorrido fundamentalmente oceánico, por zonas libres de ozono y precursores, originando por tanto episodios con máximos de ozono claramente inferiores.

Tanto este método de retrotrayectorias como el análisis de condiciones sinópticas previo han sido empleados para estudiar la influencia de la circulación atmosférica sobre las concentraciones máximas de ozono superficial medidas en el noroeste de Galicia. Se ha observado la interdependencia entre ambos sistemas de análisis para completar el estudio, obteniendo los resultados siguientes:

- Tomando como referencia el patrón sinóptico, las condiciones de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa” causan varios tipos de trayectorias, sin un origen de retrotrayectorias claramente predominante, pues el 39% son del tipo “Atlántico Sur-Portugal” y el 23% de origen local, repartiéndose el resto de orígenes distintos de forma equitativa. Bajo el segundo tipo sinóptico más frecuente, el “Pantano barométrico”, las trayectorias de tipo “Mediterráneo-Peninsular” dominan claramente, apareciendo en más del 83% de los episodios de este tipo sinóptico. La situación de “Vaguada Ibérico-Africana” no causa ninguna trayectoria predominante, pues presenta una distribución prácticamente similar entre los cuatro tipos principales, destacando ligeramente el origen “Franco-Cantábrico”, con un 40%.
- Desarrollando el análisis opuesto, que considera el tipo de trayectorias como base, la situación sinóptica predominante para el origen africano-portugués y el origen local es el patrón de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, con el 56% y 43%, respectivamente. El tipo “Mediterráneo-Peninsular” está claramente asociado a la situación sinóptica de “Pantano barométrico”, con un 71% de los episodios que presentan esta trayectoria. El origen “Franco-Cantábrico” o centroeuropeo se presenta bajo condiciones sinópticas diversas, destacando las “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa” y la “Vaguada Ibérico-Africana”, ambas con un 33%, seguidas del “Anticiclón Británico-Escandinavo” y el “Anticiclón Centroeuropeo”, con un 17% de probabilidad.

En conclusión, se observa una intensa dependencia biunívoca entre el origen “Mediterráneo-Peninsular” y la situación de “Pantano barométrico”, y una relación importante, aunque de menor grado, entre las “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa” y los orígenes africano-portugués y local. La relación entre el resto de tipos sinópticos y retrotrayectorias no presenta ninguna dirección predominante.

#### 3.5.4 Análisis meteorológico

La sección 3.5.4 se centra en la descripción de los datos meteorológicos recogidos durante los episodios con altos niveles de ozono seleccionados, de acuerdo con la metodología explicada en el apartado 2.3 del capítulo anterior. Se han analizado los parámetros meteorológicos más relevantes para la formación y transporte de ozono troposférico durante los períodos seleccionados (temperatura, intensidad y dirección de viento, radiación solar y precipitación), a partir de datos registrados en seis estaciones situadas en la zona de estudio, ya citadas (B1-A Magdalena, B2-Louseiras, C9-Mourence, F2-Fraga Redonda, G2-Vilanova y D1-Mourela). El análisis meteorológico se completó con el estudio cualitativo de los perfiles en altura (temperatura, velocidad y dirección de viento) procedentes de radiosondeos, en aquellos episodios en los cuales era necesario, así como con mapas europeos de medidas meteorológicas en estaciones, para abarcar zonas adyacentes al área de estudio, cuyas condiciones (nieblas, precipitación, tormentas, etc.) podrían tener influencia en el ozono registrado en el noroeste peninsular.

### *Relación entre las configuraciones sinópticas características de los episodios de ozono y sus variables meteorológicas asociadas*

Antes de comenzar este análisis de las variables meteorológicas que caracterizan a los episodios con elevadas concentraciones de ozono en el noroeste gallego, se presenta una breve descripción de la meteorología local que se asocia con los principales patrones sinópticos bajo los cuales tenían lugar los episodios de ozono en el noroeste peninsular. Para ello se han utilizado registros meteorológicos de temperatura, viento (velocidad y dirección) e insolación procedentes de una extensa red de estaciones meteorológicas dispuestas por toda la geografía gallega. Estos datos han sido suministrados por MeteoGalicia (Meteogalicia, 2010) y se han relacionado con cada uno de los tipos sinópticos de la clasificación de Font-Tullot considerados durante el análisis sinóptico de los episodios.

#### a) Altas presiones sobre el Atlántico y Europa

Su principal característica son las elevadas temperaturas máximas (figura 3.41), que pueden superar con facilidad los 30 °C en muchas áreas del interior de Galicia, como el valle de Ourense y el valle de Lemos, y también en regiones costeras, como las Rías Baixas. Aún así, el establecimiento de las brisas costeras suele frenar el ascenso térmico en el litoral, dificultando que se alcancen máximas superiores a 30 °C.



Figura 3.41: “Registros de temperatura máxima (°C) en el día 20 de Junio de 2003 (jornada central del episodio nº 8), correspondiente al tipo sinóptico de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa” en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”

Los vientos son flojos, dominando la componente Este, aunque el establecimiento de circulaciones locales en la costa y las áreas montañosas suele provocar cambios de dirección en muchas estaciones, como brisas del Oeste en la costa atlántica (figura 3.42).



Figura 3.42: “Registros de velocidad media (izquierda, en km/h) y dirección de viento predominante (derecha, en grados Norte meteorológicos) el día 7 de Junio de 2006 (jornada central del episodio nº 24), también correspondiente al tipo sinóptico de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”



Figura 3.43: “Registros de temperatura máxima (°C) en el día 1 de Agosto de 2004 (jornada central del episodio nº 6), correspondiente al tipo sinóptico “Pantano barométrico”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”





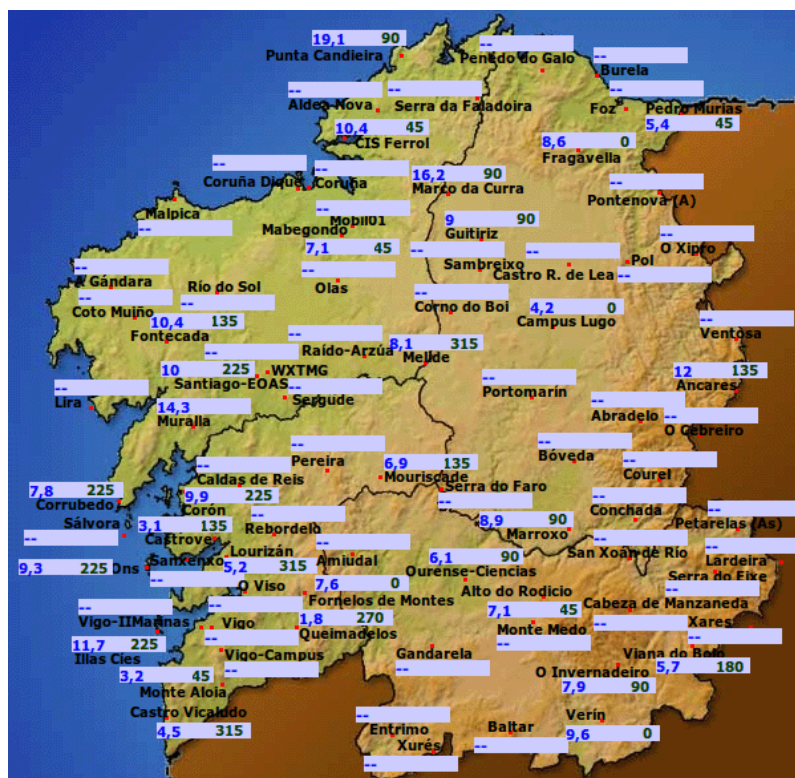


Figura 3.45: “Registros de velocidad media (izquierda, en km/h) y dirección de viento predominante (derecha, en grados Norte meteorológicos) durante el día 13 de Julio de 2005 (jornada central del episodio nº 20), correspondiente al tipo sinóptico “Vaguada ibero-africana”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”

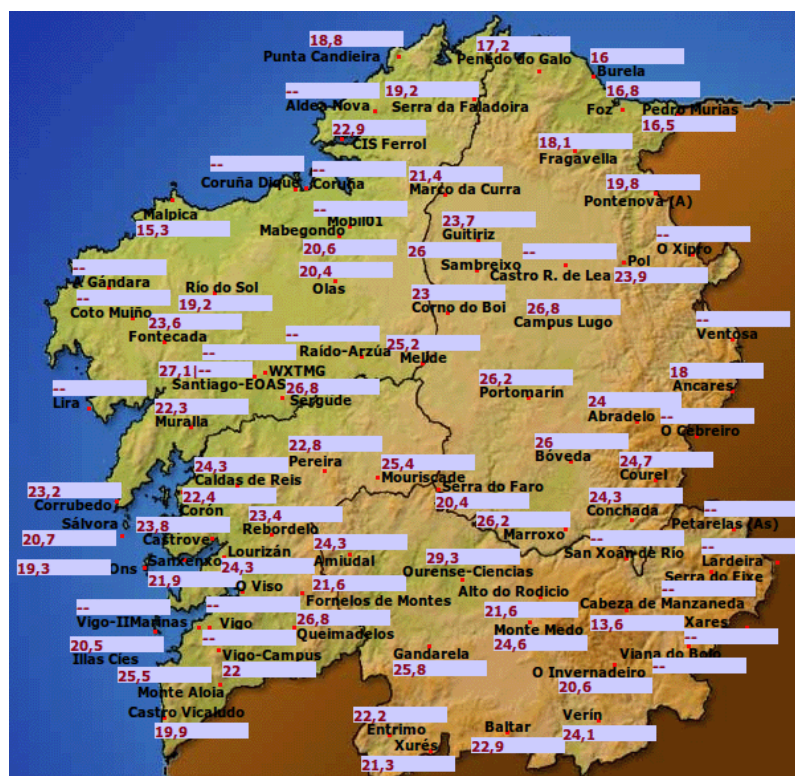


Figura 3.46: “Registros de temperatura máxima (°C) en el día 21 de Abril de 2007 (jornada central del episodio nº 29), correspondiente al tipo sinóptico “Depresión del golfo de Cádiz”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”



d) Depresión del golfo de Cádiz

Las temperaturas máximas (figura 3.46) son notablemente inferiores a las de los tipos anteriores, por debajo de 25 °C en el litoral sur y en torno a 20 °C en el litoral norte, mientras que en el interior, aunque las temperaturas son superiores, no se alcanzan los 30 °C. Esta diferencias térmicas pueden obedecer a la formación de bancos de nieblas locales, a la existencia de nubosidad aislada en algunas zonas (A Mariña lucense, por ejemplo) o a las diferentes intensidades de viento.

El viento sopla de componente Este, con intensidad floja, salvo en algunos puntos del tercio norte de la Comunidad Gallega.

e) Anticiclón británico-escandinavo

Este patrón sinóptico se caracteriza por jornadas soleadas, aunque presenta temperaturas suaves en todo el territorio gallego, con máximas inferiores a 20 °C, salvo en algunas áreas aisladas, siendo más bajas en el tercio norte (figura 3.47).



Figura 3.47: “Registros de temperatura máxima (°C) en el día 21 de Marzo de 2003 (jornada central del episodio n° 6), correspondiente al tipo sinóptico “Anticilón británico-escandinavo”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”

El viento dominante es de componente Este, soplando del NE en muchas áreas, lo cual no favorece el ascenso térmico, y su velocidad es baja en general, por debajo de los 15 km/h, con mayor intensidad en el litoral norte (figura 3.62).

f) Anticiclón atlántico-mediterráneo

Esta situación sinóptica se caracteriza por los cielos despejados, con temperaturas suaves que conforman un gradiente térmico desde el litoral hacia el interior. Las temperaturas

máximas no superan en la costa los 20° C, registro térmico que sí es frecuente en las estaciones interiores.

El régimen de vientos (figura 3.48) viene marcado por la componente Norte, a diferencia de los tipos anteriores, oscilando entre el NO, dominante en la costa norte y el NE, más frecuente en el litoral atlántico. La intensidad media del viento es baja, por debajo de los 10 km/h, salvo en áreas montañosas y puntos de las Rías Baixas, en los cuales supera los 20 km/h.

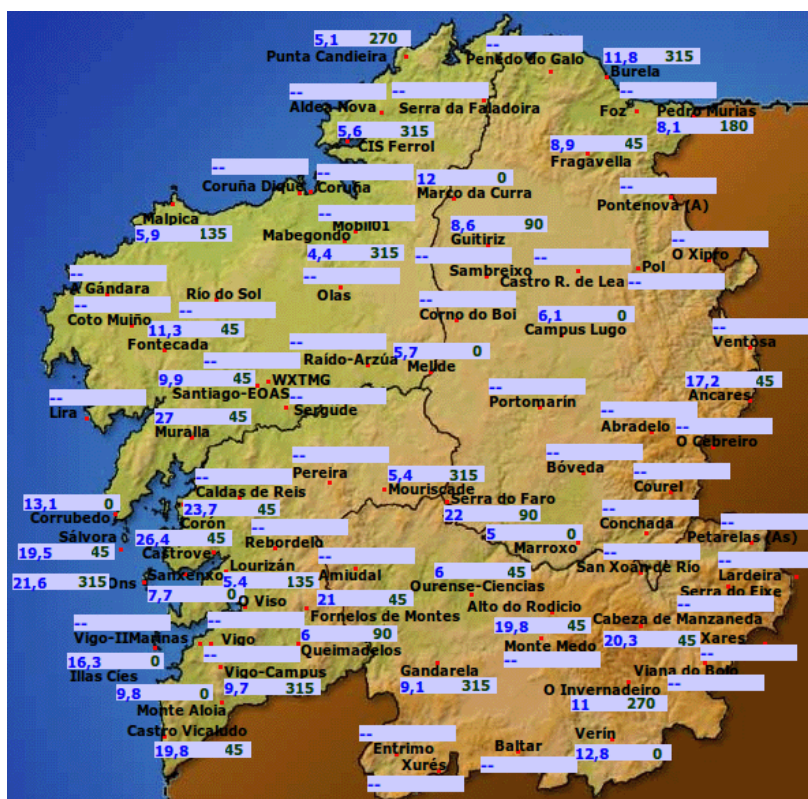


Figura 3.48: “Registros de velocidad media (izquierda, en km/h) y dirección de viento predominante (derecha, en grados Norte meteorológicos) durante el día 6 de Mayo de 2007 (jornada central del episodio nº 30), correspondiente al tipo sinóptico “Anticiclón atlántico-mediterráneo”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”

#### g) Anticiclón centroeuropeo

Las temperaturas máximas (figura 3.49) alcanzan valores notables en el noroeste peninsular, con registros superiores a los 25 °C en muchos puntos de Galicia, a pesar de la existencia de nubosidad local.

Estas altas temperaturas son consecuencia del viento seco de componente Sur, procedente del interior, con vientos del SE en la parte oriental y del E en la costa atlántica (figura 3.50). La velocidad de viento es muy baja, sin superar los 10 km/h.





Figura 3.49: “Registros de temperatura máxima (°C) el día 27 de Septiembre de 2002 (jornada central del episodio n° 5), correspondiente al tipo sinóptico “Anticiclón centro europeo”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”



Figura 3.50: “Registros de velocidad media (izquierda, en km/h) y dirección de viento predominante (derecha, en grados Norte meteorológicos) durante el día 27 de Septiembre de 2002 (jornada central del episodio n° 5), correspondiente al tipo sinóptico “Anticiclón centroeuropeo”, en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Fuente: Meteogalicia (2010)”

#### h) Circulación ondulada a bajas latitudes

Los registros térmicos propios de este tipo sinóptico son suaves, con temperaturas máximas inferiores al resto de tipos, sin sobrepasar los 20 °C e incluso por debajo de 15 °C en zonas elevadas, debido a la presencia de nubosidad.

Los vientos son flojos y variables, aunque domina la componente Oeste, sobre todo en el litoral atlántico. Son vientos de intensidad muy floja, salvo en puntos elevados donde pueden superar ligeramente los 10 km/h.

Los tres tipos sinópticos iniciales, “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, “Pantano barométrico” y “Vaguada ibero-africana”, conformaban el 75% de los episodios de ozono analizados, lo cual está de acuerdo con las características meteorológicas de los mismos, muy semejantes y dominadas por las elevadas temperaturas, que facilitarían la existencia de unos importantes niveles de fondo, dadas las favorables condiciones para la generación autóctona de ozono troposférico. En el resto de tipos sinópticos, destacan las temperaturas suaves y los vientos de carácter flojo, generalmente de componente Este, salvo algunas excepciones con vientos del Norte, Sur e incluso Oeste.

Es necesario resaltar que esta descripción de la meteorología asociada a los patrones sinópticos bajo los cuales se desarrollaron los episodios analizados no puede considerarse como modelo absoluto para dichos patrones, dado el escaso número de repeticiones en algunos de ellos, de los cuales apenas hay uno o dos episodios. Sin embargo, sí aporta datos relevantes a la hora de analizar el desarrollo de los episodios, relacionando las condiciones sinópticas y la meteorología local, e incluso podría acercarse al modelo general en los tres tipos principales (“Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, “Pantano barométrico” y “Vaguada ibero-africana”), para los cuales sí hay un número más elevado de episodios.

#### *Relación entre los niveles de inmisión de ozono y la meteorología local durante los episodios de ozono*

Las variables meteorológicas elegidas para su estudio en relación con los niveles de ozono registrados en cada episodios han sido la temperatura superficial a 2 metros, la dirección y velocidad de viento a 10 metros, la radiación solar incidente y la precipitación.

#### a) Temperatura

La temperatura es uno de los factores meteorológicos con más influencia en la formación de ozono, mediante dos vías confluyentes, una indirecta y otra directa: las altas temperaturas catalizan las reacciones fotoquímicas de formación de ozono troposférico, además de estar directamente relacionadas con la intensidad de radiación solar, elemento básico en la fotoquímica del ozono.

Los episodios analizados reflejan esa dependencia entre temperatura y concentración superficial de ozono, como era de esperar, pues las concentraciones máximas de ozono se alcanzan con registros elevados de temperatura. Esta situación se observa en la figura 3.51, según la cual dos tercios de los episodios presentan el valor máximo de ozono con registros térmicos superiores a 25 °C, temperatura notablemente mayor que la media de las temperaturas máximas durante el período estival (Junio-Septiembre) en la zona de estudio, de acuerdo con los datos recogidos en la cercana estación meteorológica de Marco da Curra (concello de Monfero) entre los años 2002 y 2007, que no suele superar los 22 °C (MeteoGalicia, 2002-2007).

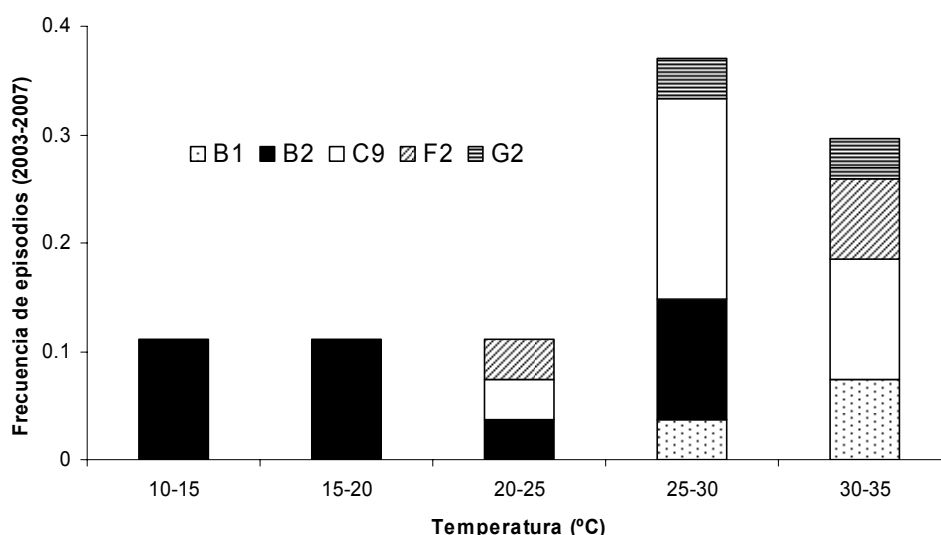


Figura 3.51: "Distribución porcentual de los episodios según la temperatura a la que se alcanza el máximo de ozono troposférico, clasificados de acuerdo con la estación en que se registra el valor máximo de ozono. Se han considerado únicamente los 27 episodios identificados entre 2003 y 2007, por falta de datos de temperatura en el año 2002"

Sin embargo, existen varias características destacables dentro de esta tendencia general:

- El grado de correlación lineal "temperatura-ozono superficial" varía enormemente de unas estaciones a otras, siendo mucho más elevado en las estaciones urbanas que en las estaciones rurales, como se observa en la figura 3.52. Una de las causas principales se debe al tiempo de permanencia del ozono en la atmósfera, mayor y más variable en las estaciones rurales. De este modo, durante los períodos nocturnos, con temperaturas sensiblemente inferiores, los niveles de ozono experimentan una reducción acusada en las estaciones urbanas (estación B1-A Magdalena y C9-Mourence), al registrar emisiones mayores de óxidos de nitrógeno, procedentes del tráfico; sin embargo, la reducción de ozono troposférico es inferior durante la noche en estaciones rurales (estación B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda), debido a la inhibición de mecanismos de limpieza por la inferior inmisión de óxidos de nitrógeno y a la existencia de repuntes nocturnos de ozono, causados por su situación topográfica en laderas de valle.
- Los máximos de ozono alcanzados en los episodios se producen dentro de un rango de temperaturas muy amplio, que va desde los 10.6 °C registrados en la estación B2 en el episodio nº 6, cuando se produjo un máximo episódico de 148  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de ozono, hasta los 34.8 °C de la estación F2, con un máximo de 158  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de ozono medido durante el episodio nº 19.

Esta situación puede ser indicativa de la existencia de otro tipo de procesos que contribuyen a la presencia de ozono superficial, al margen de la producción fotoquímica local, como el transporte a larga distancia o intrusiones de ozono estratosférico, lo que justifica la existencia de diferentes clases de episodios. La figura 3.51 indica la relación entre máximos episódicos y temperatura a la que se alcanzan, distribuyéndolos por estación: se observa que los máximos acaecidos con temperaturas bajas (inferiores a 20°C) pertenecen a la estación B2-Louseiras, mientras que el resto de estaciones se reparten los máximos que tienen lugar a temperaturas elevadas (por encima de 25°C). La causa está relacionada de nuevo con la distinta orografía y situación topográfica de las estaciones, pues la estación B2-Louseiras suele registrar aumentos relativos de la inmisión de ozono durante la noche, ya que al estar situada a cierta altura sobre la ladera de un valle, son frecuentes los fenómenos de inestabilidad nocturna debido al régimen local de vientos, lo cual favorece la mezcla del ozono existente en estratos superiores.

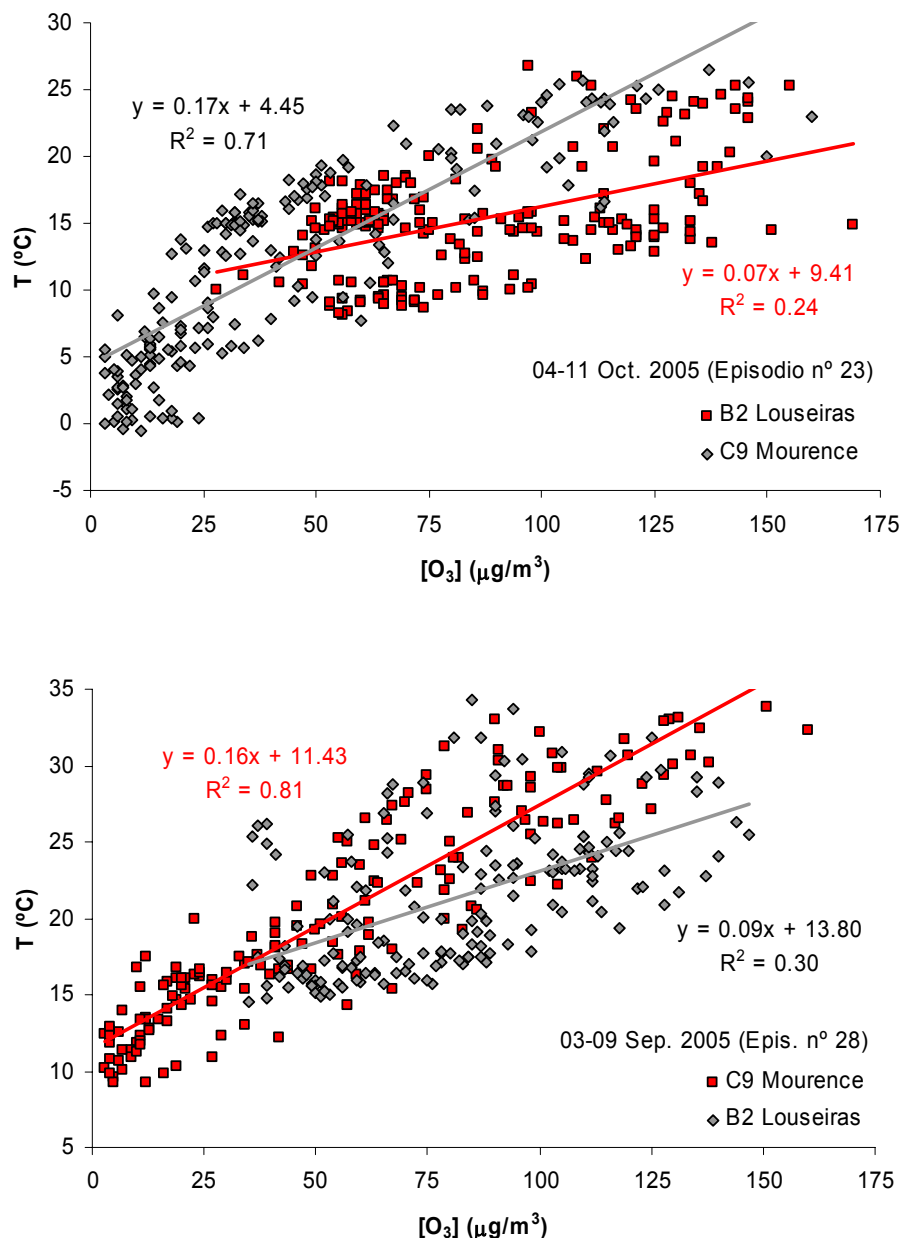


Figura 3.52: "Correlación lineal entre la inmisión de ozono troposférico y la temperatura superficial para las estaciones B2-Louseiras (rural) y C9-Mourence (suburbana de tráfico) en dos episodios diferentes. La estación en que se alcanza el máximo absoluto del episodio se representa en rojo: B2 en el episodio nº 23 (arriba) y C9 en el episodio nº 28 (abajo)"

- El grado de correlación entre el máximo de ozono superficial y la temperatura a la que se registra dicho máximo es muy débil en los episodios analizados (figura 3.53), por debajo de  $r^2 = 0.15$ . Esta circunstancia constituye un argumento a favor de la existencia de causas diversas para los episodios analizados, que no pueden reducirse a un simple fenómeno de producción fotoquímica de ozono a partir de precursores locales, pues en este caso se esperaría un coeficiente de correlación bastante superior.

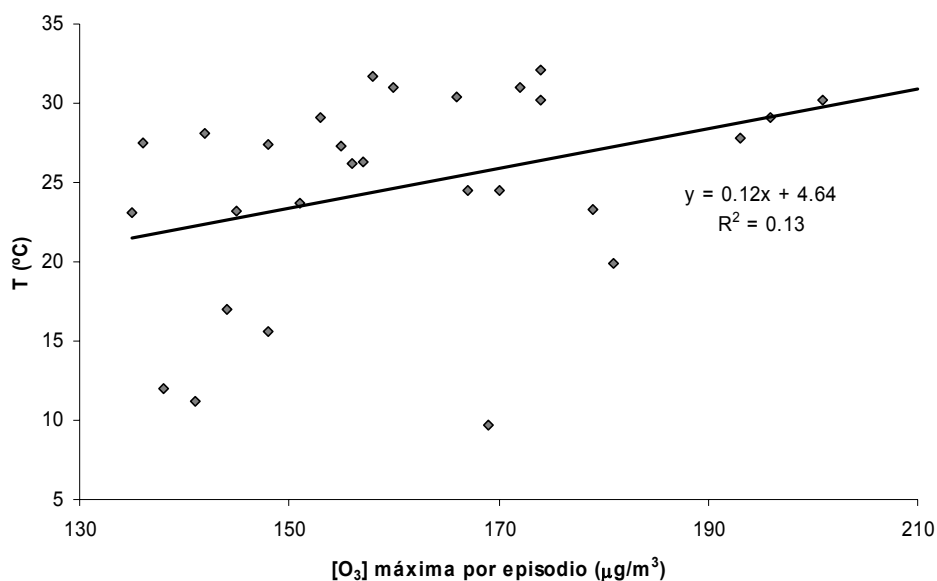


Figura 3.53: "Correlación lineal entre la inmisión máxima de ozono troposférico y la temperatura superficial en la estación D1-A Mourela, considerada como representativa del área de estudio. La correlación ha sido realizada con veintiocho episodios de los treinta y dos analizados en el período 2002-2007, debido a que en cuatro de ellos se carecía del dato de temperatura en la estación empleada"

Por otra parte, además de la tendencia general analizada, existe un frecuente fenómeno local de importancia relacionado con la temperatura, y centrado fundamentalmente en la estación B2-Louseiras y también en F2-Fraga Redonda, aunque de forma menos acusada. Se trata de los repuntes nocturnos de inmisión de ozono, que en algunas ocasiones constituyen el máximo absoluto del episodio, como en los episodios nº 7 (161  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 05 UTC en B2), nº 15 (181  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 00 UTC en B2), nº 17 (141  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 02 UTC en B2), nº 23 (169  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 23 UTC en B2) y nº 30 (138  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 07 UTC en B2), mientras que en muchos otros episodios simplemente conforman máximos relativos de ozono (episodios nº 8, nº 22, nº 24, nº 26, nº 31, etc.).

Este fenómeno de incremento nocturno de ozono troposférico se analiza a continuación, tomando como base los dos días centrales (31 de Julio y 01 de Agosto) del episodio nº 15, del 28 de Julio al 05 de Agosto de 2004 (figura 3.54). En este episodio, el registro máximo de ozono troposférico (181  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se alcanza el día 1 de Agosto en la estación B2-Louseiras a las 02 (hora local, correspondiente a las 00 UTC), ya en período nocturno. Este máximo absoluto se produce simultáneamente con un ascenso térmico de más de 3.5 °C entre las 18 UTC del día 31 de Julio y las 00 UTC del día 1 de Agosto, el cual no se corresponde con un incremento en la radiación solar por disminución de la nubosidad, ya que el perfil de temperatura en B2-Louseiras es el clásico de día despejado, y las medidas de la radiación solar en la estación D1-A Mourela, distante unos 12 km de B2-Louseiras no muestran ninguna alteración. El viento experimenta a su vez dos cambios durante estas seis horas en las cuales se producen el aumento de ozono:

- Acusada disminución de la velocidad de viento en superficie, que pasa de valores superiores a los 2.5 m/s a registros inferiores a 1.0 m/s, considerados prácticamente como calmas
- Cambio en la dirección del viento, que rola desde el ENE característico de las horas previas al incremento de ozono hasta el ESE durante el aumento de los niveles de ozono

La estación B2 se sitúa en la ladera de un valle con dirección NO-SE, tributario de un valle principal en dirección NNE-SSO. Este emplazamiento de B2-Louseiras sobre una ladera de

valle, ya en una zona próxima a la cima, favorece el desarrollo de vientos locales durante la noche, como las brisas de ladera descendentes o los vientos valle abajo. El régimen mesoescalar de vientos será más acusado cuanto menor sea el forzamiento sinóptico, como ocurre en este episodio, cuya situación sinóptica se caracteriza por un pantano barométrico. Este régimen local de vientos favorece el desarrollo de turbulencia dinámica que provoca la alteración de la capa estable nocturna, facilitando la penetración de masas de aire enriquecidas en ozono, que se sitúan en la inicialmente desacoplada capa residual (Salmond y McKendry, 2002).

La falta de perfiles en altura, tanto de variables meteorológicas (velocidad de viento y temperatura) como de concentraciones de ozono troposférico, dificultan la validación de esta hipótesis basada en la rotura de la inversión nocturna, pero hay dos circunstancias que parecen apoyar la misma, como son el notable aumento nocturno de temperatura (provocado por la mezcla de aire de capas superiores, con mayor temperatura) y la existencia de máximos diurnos de ozono en estaciones vecinas, como B1-A Magdalena, con valores muy similares a los registros nocturnos de la propia estación B2-Louseiras (dada la ausencia de fuentes conocidas de ozono en la capa estable nocturna, cualquier incremento brusco de ozono probablemente sea resultado de procesos de transporte vertical).

La figura 3.54 compara las series de inmisión de ozono en las estaciones B2-Louseiras y B1-A Magdalena, así como las evolución temporal de la temperatura, velocidad y dirección de viento durante los dos días centrales del episodio nº 15. En ella se puede observar como la serie de ozono en B2 registra un incremento nocturno claramente asociado a un ascenso térmico, mientras el perfil temporal de ozono en B1 reproduce el perfil clásico de ozono (máximo a primeras horas de la tarde, brusco descenso en las horas posteriores y valor mínimo durante la noche, debido a la deposición y a la transformación química), al igual que presenta una bajada continua de temperatura durante la noche. Destaca la existencia de máximos de inmisión de ozono muy semejantes en ambas estaciones durante la tarde del día 1 de Agosto, lo cual induce a pensar en la existencia de capas superiores enriquecidas en ozono, que se mezclan durante el desarrollo de la capa de mezcla diurna, incrementando los niveles de ozono. El resto de variables (velocidad y dirección de viento) muestra un comportamiento similar en ambas estaciones, con lo cual parece descartable el transporte horizontal de contaminantes a nivel superficial como causa del incremento de ozono nocturno, siendo la única diferencia claramente apreciable entre ambas el repunte térmico que aparece en la estación B2. Por otra parte, se ha comprobado la estabilidad nocturna entre 10 m y 80 m mediante el cálculo del número de Richardson en la estación D1-A Mourela, equiparable al de B1-A Magdalena, dada su proximidad (menos de 1500 m), sin encontrarse ninguna alteración de la estabilidad nocturna durante la noche, como era de esperar dado el comportamiento del ozono nocturno y de la temperatura en superficie. Estos datos son un indicio de la posible mezcla vertical de ozono procedente de la capa residual con las masas de aire superficiales (Elliason et al., 2003), debido al aumento de la inestabilidad nocturna, a causa de la formación de vientos locales o al desarrollo del *jet* nocturno (Corsmeier et al., 1997), sin poder establecer el motivo principal, dada la falta de medidas en altura.

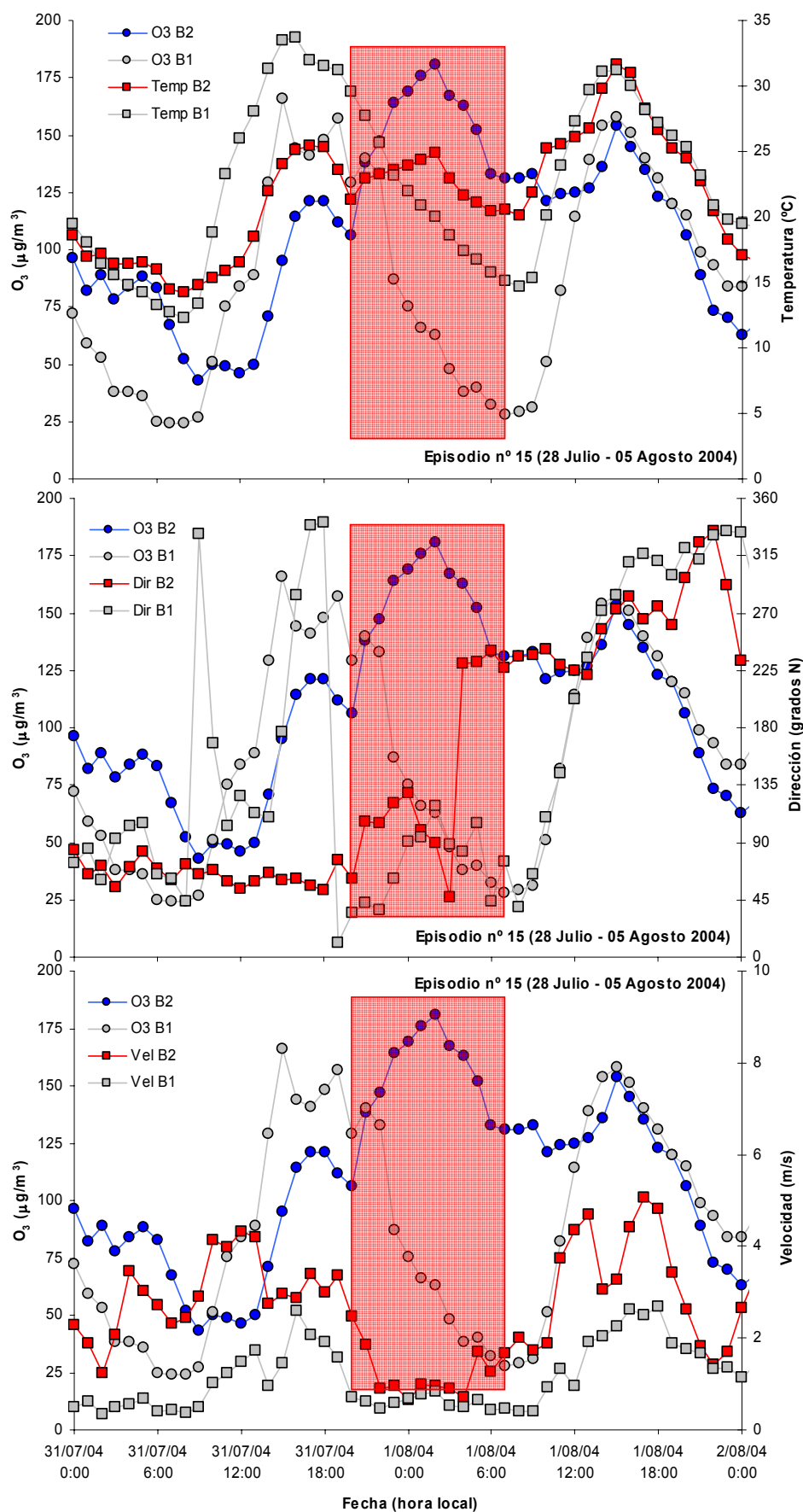


Figura 3.54: “Series temporales de concentración superficial de ozono frente a temperatura (arriba), dirección de viento (medio) y velocidad de viento (abajo) en las estaciones B2-Louseiras y B1-A Magdalena para los dos días centrales del episodio n° 15 (28 Julio – 05 Agosto 2004)”

## b) Viento: intensidad y dirección

Aunque a diferencia de la temperatura, el viento no influye directamente en la formación fotoquímica del ozono (figura 3.55), sí desempeña un papel importante en la evolución de las concentraciones de ozono troposférico, debido a su capacidad de transporte de precursores y del propio ozono, tanto horizontal por advección, como vertical por aumento de la inestabilidad, la cual aumenta la capacidad de mezcla. El transporte debido al viento puede estudiarse a diferentes escalas, desde el transporte a larga distancia, propio de la escala sinóptica, abordado en el apartado anterior (sección 3.5.3), mediante el análisis de trayectorias, hasta fenómenos de transporte local, característicos de la mesoescala beta y gamma, como las brisas de tierra-mar, los vientos de valle-montaña o los flujos sobre terrenos complejos, reflejadas por las medidas de viento en superficie analizadas en este punto.

### *Intensidad de viento*

La falta de influencia de la velocidad de viento en la formación de ozono troposférico se pone de manifiesto en la figura 3.55, que muestra una falta total de correlación entre la intensidad de viento y la concentración máxima de ozono en los episodios registrados. Sin embargo, sí permite observar el predominio de las bajas velocidades de viento durante las horas con niveles más altos de ozono, en general por debajo de 3 m/s (10.8 km/h, considerado nivel 2 en la escala Beaufort, bajo la denominación de “flojito” o “brisa muy débil”). La razón principal de estas bajas intensidades de viento asociadas a una elevada inmisión de ozono troposférico se debe buscar en la necesidad de cierto grado de dispersión y mezcla atmosférica, pero sin provocar la activación de los mecanismos de arrastre y limpieza de ozono: los niveles de ozono se incrementan con la inestabilidad diurna, al romperse la capa estable nocturna y mezclarse el aire de la capa residual superior, pero si la advección horizontal es elevada, se producirá una gran dispersión del ozono y sus precursores, así como un transporte hacia otras zonas, con lo cual disminuirán notablemente los registros de ozono en el área afectada, al impedirse la acumulación del ozono.

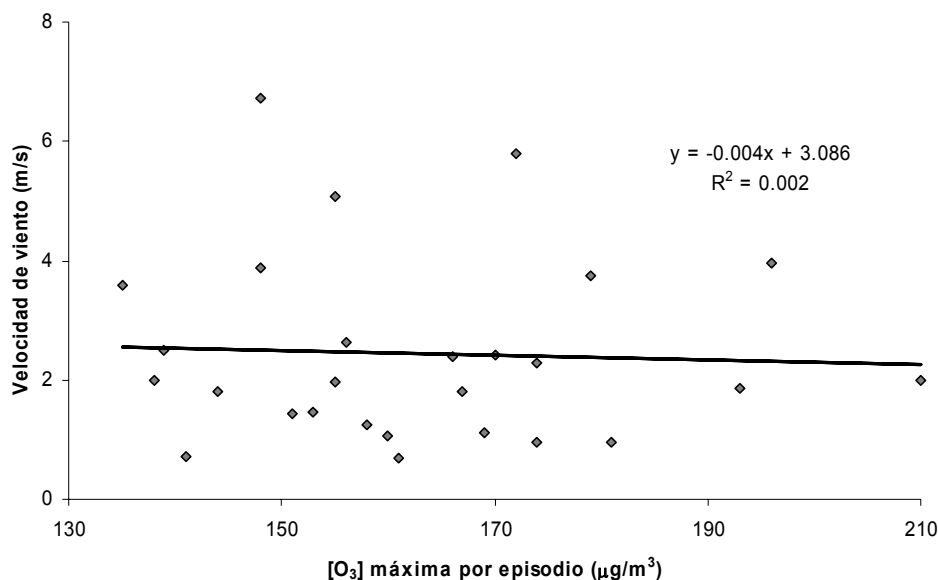


Figura 3.55: “Correlación lineal entre la inmisión máxima de ozono troposférico y la velocidad de viento a 10 m medida en la estación en la que se produce el máximo de ozono. La correlación ha sido realizada con veintisiete episodios de los treinta y dos analizados en el período 2002-2007, debido a que en cinco de ellos se carecía del dato de velocidad en la estación empleada”



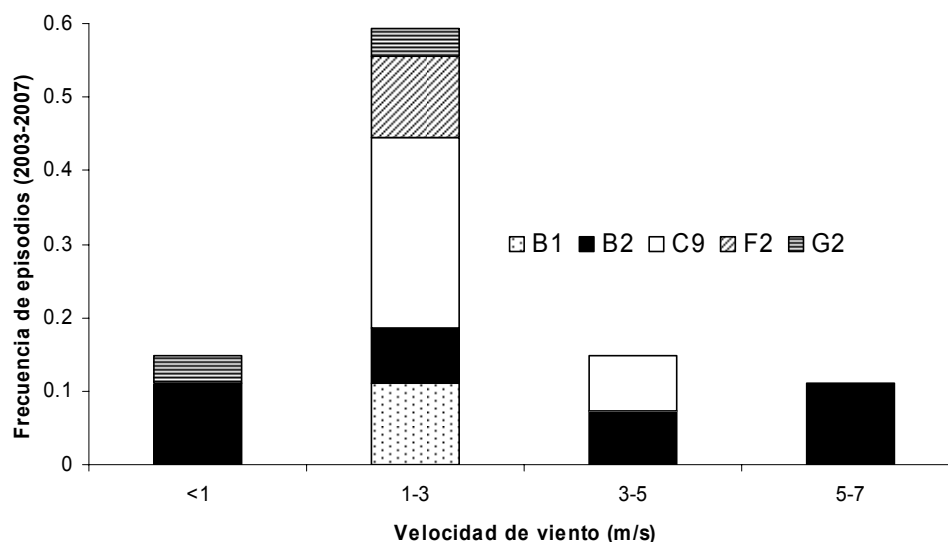


Figura 3.56: “Distribución porcentual de los episodios según la velocidad de viento a 10 m medida en el instante horario en que se registra el máximo de ozono. Se han considerado únicamente los 27 episodios identificados entre 2003 y 2007, por falta de datos de viento en el año 2002”

Esta característica se muestra con más detalle en la figura 3.56, que presenta una distribución de valores máximos de ozono en los episodios analizados en función de la intensidad de viento registrada:

- El máximo de ozono se alcanza en el 75% de los episodios bajo velocidades de viento inferiores a 3 m/s, de los cuales la mayor parte se sitúa entre 1 m/s y 3 m/s. Sólo un 15% de episodios presentan velocidades inferiores a 1 m/s, y estos valores elevados de ozono durante períodos de calma (<1 m/s) corresponden en su gran mayoría a máximos nocturnos en la estación B2-Louseiras, provocados por la citada rotura de la capa estable nocturna, que origina grandes desviaciones en la componente vertical de la velocidad de viento, pero no afecta sustancialmente a las bajas velocidades horizontales de viento características del período estable nocturno
- El tipo de configuración sinóptica bajo la cual se desarrollan los episodios de ozono en el noroeste peninsular favorecen la falta de viento en superficie, al tratarse de situaciones asociadas a una elevada estabilidad atmosférica y débil forzamiento sinóptico, como la “Vaguada ibero-africana”, el “Pantano barométrico” o los anticlones de bloqueo sobre las Islas Británicas, característicos de las “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”
- Las estaciones situadas a mayor altura, como B2-Louseiras (540 m) e incluso C9-Mourence (465 m), son las que registran episodios con máximos de ozono asociados a altas velocidades de viento, incluso por encima de 5 m/s (episodio nº 6, nº 26 y nº 29), en los cuales el transporte de contaminantes suele ser un factor importante en su desarrollo

La existencia de fenómenos locales de viento tiene una gran importancia en el análisis de los episodios, al favorecer en muchos casos el incremento de los niveles de ozono por transporte o recirculación de contaminantes (Evtugina et al., 2006; Millán et al., 1996, 2000; Gangoiti et al., 2002; Barros et al., 2003; Hastie et al., 1999, etc.), como en el caso de las brisas marinas, o por transporte y alteración de la estabilidad nocturna, como en los vientos de valle-montaña (McKendry et al., 1998; Salmond y McKendry, 2002; Sánchez et al., 2005; Baumbach y Vogt, 1999, etc.). La situación geográfica, próxima al mar, y el tipo de orografía, compleja y ondulada, que caracterizan al área de estudio favorece la aparición de este clase de vientos: las brisas marinas afectan sobre todo a las estaciones G2-Vilanova y F2-Fraga Redonda (episodios nº 7, nº 10, nº 11, nº 12, nº 22, nº 23, nº 31, etc.), dada su mayor proximidad al mar, aunque se trata de un fenómeno general en el área de estudio, mientras los vientos de valle-montaña son

propios de las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda (episodios nº 8, nº 23, nº 24, etc.), por su situación sobre laderas de valle.

El episodio nº 11 (12-22 de Septiembre de 2003) es un ejemplo representativo de los episodios dominados por las brisas marítimas en el área de estudio (Saavedra et al., 2007), según se observa en la figura 3.57.

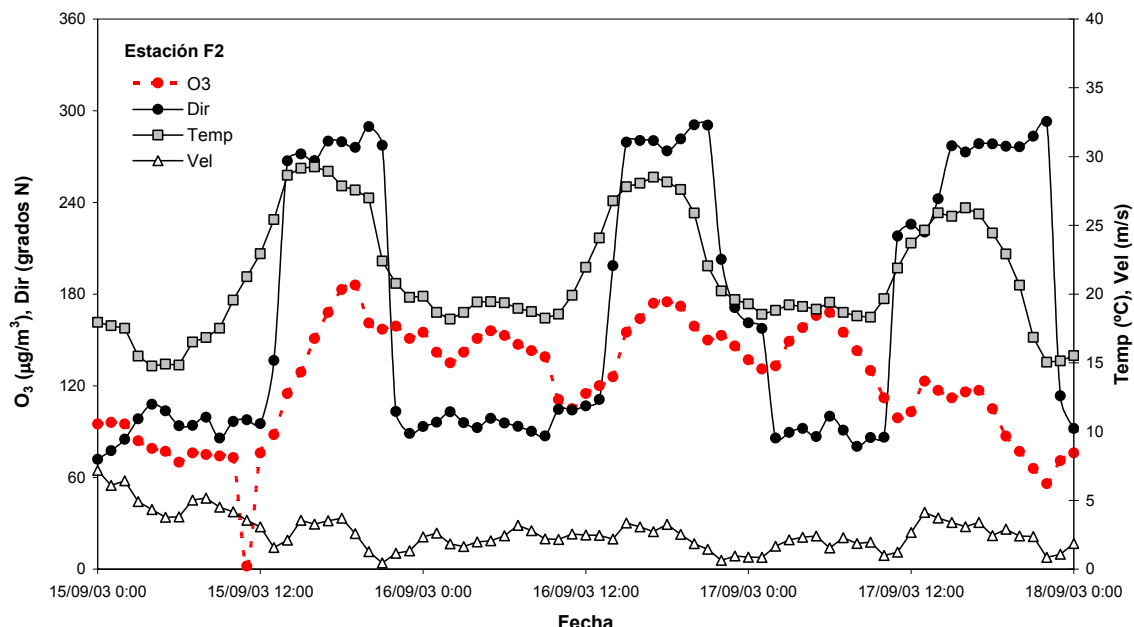


Figura 3.57: “Series temporales de inmisión de ozono, velocidad y dirección de viento y temperatura registradas en la estación F2- Fraga Redonda durante los días centrales del episodio nº 11 (12-22 de Septiembre de 2003), en las cuales se aprecia el establecimiento del régimen de brisas marinas durante la tarde”

La figura 3.57 muestra el establecimiento de brisas del oeste, procedentes del mar, durante la tarde de los días 15 - 17 de Septiembre, en la estación F2-Fraga Redonda, situada a unos 15 km del océano Atlántico. Estas brisas se desarrollan a partir de las 12 UTC (14 hora local) UTC, coincidiendo con el aumento acusado de temperatura, mientras por la noche, a medida que disminuye la temperatura, el viento rola a componente E.

La estación F2-Fraga Redonda presenta valores elevados de ozono durante todo el período, con valores máximos muy similares durante la tarde de los días 15 y 16 de Septiembre (186 y 175  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente), mientras el día 17 la inmisión desciende ligeramente, registrando un máximo diurno de 123  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , semejante al registrado el día 14 (no mostrado en la figura). Por otra parte, el descenso nocturno de la inmisión de ozono es muy débil, manteniéndose siempre por encima de los 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e incluso con la aparición de máximos secundarios.

Estas elevadas concentraciones nocturnas de ozono pueden obedecer a varios factores, como la escasa destrucción de ozono por falta de óxidos de nitrógeno, al tratarse de una estación de carácter rural, y la rotura de la capa estable nocturna con la consiguiente mezcla de ozono situado en la capa residual (indicada de nuevo por los repuntes térmicos nocturnos). Independientemente de los factores que la causan, las altas concentraciones nocturnas de ozono indican una permanencia temporal del mismo en el entorno de la estación, a la cual contribuye el sistema de brisas al actuar como célula de recirculación de contaminantes y precursores, ya que impiden la limpieza de los estratos superiores de aire, al inyectar en ellos ozono superficial durante el día, debido al flujo ascendente de aire que comunica con el flujo en altura, de retorno hacia el mar (figura 1.12).

Los máximos diurnos de inmisión, al margen del aporte existente por producción fotoquímica local, dadas la alta insolación y temperatura, también se ven aumentados por el régimen de brisas, debido a dos razones:

- La citada recirculación de ozono, que trae de nuevo a la zona ozono envejecido, formado sobre la misma el día anterior
- Aporte de ozono y precursores del litoral costero, el llamado arco Ártabro, con un nivel de industrialización y población mucho mayor que las zonas interiores donde se realiza el estudio, al situarse en él dos de las siete ciudades mayores de Galicia (A Coruña y Ferrol, con 250.000 y 67.000 habitantes, respectivamente). El hecho de que el máximo diurno del día 17 sea sensiblemente menor ( $60\text{--}70\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  inferior) al registrado los días 15 y 16, con unas condiciones meteorológicas y de inmisión muy semejantes a las existentes en la zona durante las dos jornadas anteriores, constituye un indicio claro de la contribución del transporte de ozono por las brisas marinas desde el área litoral: los datos meteorológicos de la estación de la Agencia Estatal de Meteorología situada en Alvedro (aeropuerto de A Coruña) indican la presencia de nieblas costeras persistentes, con una temperatura máxima de  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  (frente a los  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  alcanzados en F2-Fraga Redonda, sin desarrollo de nieblas), con lo cual la producción fotoquímica de ozono se verá ampliamente reducida, y por tanto disminuirá su concentración en las masas de aire impulsadas por la brisa hacia el este, área en que se encuentran las estaciones F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova, con un patrón de comportamiento muy similar.

#### Dirección de viento

La rosa de vientos que muestra las direcciones predominantes del viento durante el máximo de ozono registrado en los episodios analizados (figura 3.58, izquierda) presenta una estructura de carácter dicotómico, con dos componentes claramente predominantes, Oeste y Este, con un 55% y 30% de los casos, respectivamente.

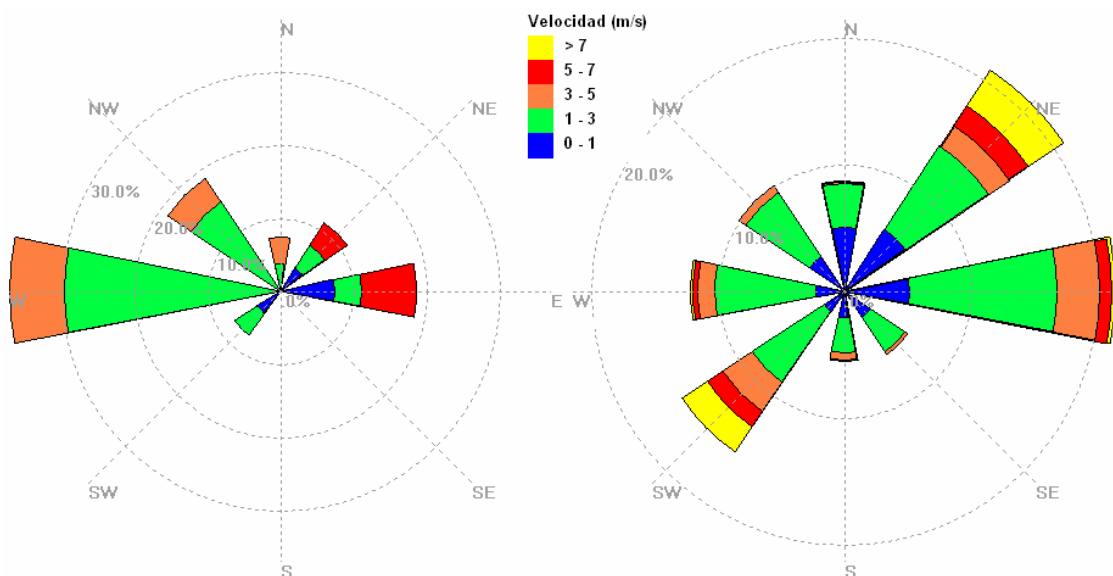


Figura 3.58: "Rosa de vientos indicando la distribución de direcciones de viento a 10 m registradas en la estación y período horario en que se midió el máximo de ozono para los episodios analizados (izqda.) y rosa de vientos realizada con los datos horarios de viento de las cinco estaciones (B1, B2, C9, F2 y G2) correspondientes a los meses de Mayo a Septiembre en el período 2004-2006 (dcha.). Para la realización de la rosa de vientos correspondiente a los episodios de ozono se han considerado únicamente los 27 episodios identificados entre 2003 y 2007, por falta de datos de viento en el año 2002"

Esta dicotomía es un reflejo de las diferentes escalas de los fenómenos meteorológicos que influyen en la inmisión del ozono troposférico: la situación sinóptica, con su circulación de flujo asociada, y la mesoscala - alfa, con su régimen local de vientos:

- Las situaciones de carácter anticiclónico son las que presentan las condiciones favorables para la generación de ozono, al ser responsables de los períodos estables, con alta insolación y escasa nubosidad; en el noroeste peninsular, este escenario sinóptico presenta circulación de componente Este, generalmente con vientos del NE en la costa norte gallega, lo cual justifica la aparición de esta dirección Este asociada a una fracción importante de los máximos de ozono
- La componente Oeste se debe a fenómenos locales, como la circulación atmosférica litoral, responsable de las brisas marítimas, características de estaciones como F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova, a vientos de valle-montaña, en B2-Louseiras, e incluso a situaciones de escaso forzamiento sinóptico, que favorecen la entrada de brisas en el interior, como en la estación C9-Mourence

Esta hipótesis se ve reforzada con los datos de intensidad de viento, que indican velocidades notablemente superiores en las situaciones advectivas del Este, siendo una muestra del dominio en estos casos de la componente sinóptica frente a fenómenos locales, favorecidos por un forzamiento sinóptico más débil, que permite el establecimiento de dichos vientos locales, favorecidos por la orografía de la zona.

La comparación entre las direcciones de viento asociadas al máximo de ozono en los episodios registrados (figura 3.58, izqda.) y las direcciones predominantes en las estaciones estudiadas durante el período de Mayo a Septiembre (figura 3.58, derecha), que concentra el 85% de los episodios identificados, permite establecer algunas consideraciones de interés sobre el origen de los altos niveles de ozono en la región de estudio:

- La climatología gallega durante la época estival se caracteriza por los vientos de componente Este, con un reparto similar entre el “nordés” y los vientos del Este, pero los períodos con altos niveles de ozono troposférico presentan una mayor proporción de situaciones advectivas del Este frente al Nordeste, con velocidad de viento elevada, lo cual parece indicar una mayor incidencia de las masas de ozono transportadas desde la costa asturiana, el interior de Asturias y el norte de Castilla-León, frente al transporte de ozono directamente desde el mar Cantábrico y el litoral norte gallego (A Mariña lucense, por ejemplo). Esta conclusión se ve apoyada por el análisis de trayectorias, que indicaba un claro predominio de las trayectorias con dirección Este de entrada a la región, con respecto a la dirección Nordeste, tanto a 1500 m (figura 3.34) como en superficie (no mostrado). Por otra parte, la apreciable proporción de episodios de componente Este con muy baja intensidad de viento (inferior a 1 m/s) corresponden a máximos nocturnos en la estación B2-Louseiras, cuyas causas ya fueron citadas.
- La elevada proporción de episodios que se registran con vientos flojos de componente Oeste (O y NO), con un porcentaje superior al 55%, frente al escaso 25% de episodios que alcanzan su máximo con el viento de componente Este, característico del verano en el norte de A Coruña, es un claro indicador de la relevancia de los fenómenos de brisas en el desarrollo de los episodios de ozono en la región; su principal efecto consiste en el arrastre de contaminantes desde el cinturón urbano-industrial costero, además de favorecer su recirculación y acumulación. Por otra parte, esta componente Oeste, además de la generación fotoquímica local, podría englobar también el transporte de contaminantes desde el litoral portugués, ya que los vientos sinópticos de componente Sur pueden entrar en el litoral atlántico gallego en dirección Oeste, debido a la configuración de las rías gallegas, como se observa en la modelización meteorológica y de retrotrayectorias de los episodios nº 19, nº 21, nº 24 y nº 32.
- Los máximos con vientos del Suroeste son muy escasas en comparación con la relevancia de estos vientos durante el período estival, pues éstos se corresponden con la entrada de perturbaciones ciclónicas atlánticas y sus frentes asociados, que ejercen un efecto contrario sobre las concentraciones de ozono, tendiendo a disminuir sus niveles. El

pequeño porcentaje de máximos de ozono bajo estas situaciones tiene de nuevo su origen más probable en situaciones de brisas locales.

En resumen, los registros meteorológicos de viento superficial en la zona de estudio subrayan el papel preponderante de los fenómenos locales (brisas marinas y brisas de valle-montaña) en el desarrollo de los episodios de ozono, pero aportan muy poca información sobre el origen inicial del ozono (transporte alóctono, generación fotoquímica autóctona o ambos), algo esperable dada la complejidad del relieve del norte gallego. Sin embargo, sí parece confirmarse la importancia del transporte desde las regiones orientales (litoral cantábrico y Submeseta Norte), dada la apreciable proporción de episodios con vientos moderados (5-7 m/s) de componente E, y la contribución de la formación fotoquímica local, ya que en cualquier dirección dominan ampliamente los vientos de carácter flojo (0-3 m/s).

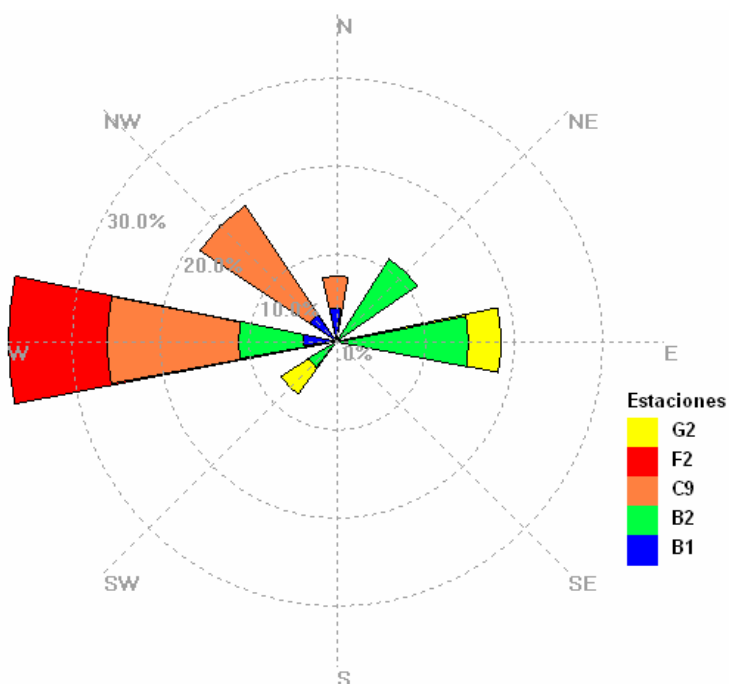


Figura 3.59: "Rosa de vientos indicando la distribución de direcciones de viento a 10 m por estación, registradas en el intervalo horario en que se midió el máximo de ozono para los episodios analizados. Se han considerado únicamente los 27 episodios identificados entre 2003 y 2007, por falta de datos de viento en el año 2002"

Las direcciones de viento relacionadas con los máximos episódicos, si se analizan en función de las estaciones en que se alcanzan dichos máximos (figura 3.59), también muestran una distribución muy clara, determinada por su situación geográfica y topográfica, destacando los aspectos siguientes:

- Todos los episodios con máximo en la estación F2-Fraga Redonda se registran con vientos del Oeste en dicha estación. Esto se debe a que la estación F2-Fraga Redonda es la más afectada por las brisas, dada su proximidad al océano Atlántico (16 km) y su situación de cara al mar en el valle del río Eume, que se abre desde la ría de Pontedeume en dirección Oeste-Este, favoreciendo el encañonamiento de las brisas costeras hacia el interior. Los máximos episódicos en esta estación parecen tener su causa en la recirculación y almacenamiento de ozono troposférico provocada por el establecimiento del sistema de brisas mar-tierra, independientemente del origen último del ozono (transporte advectivo o generación fotoquímica local), bajo un escaso gradiente barométrico.

Como ejemplo típico se describe a continuación el episodio nº 19, del 16 al 25 de Junio de 2005. La figura 3.60 compara la evolución temporal de la inmisión de ozono en las estaciones próximas F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova durante sus tres días centrales.

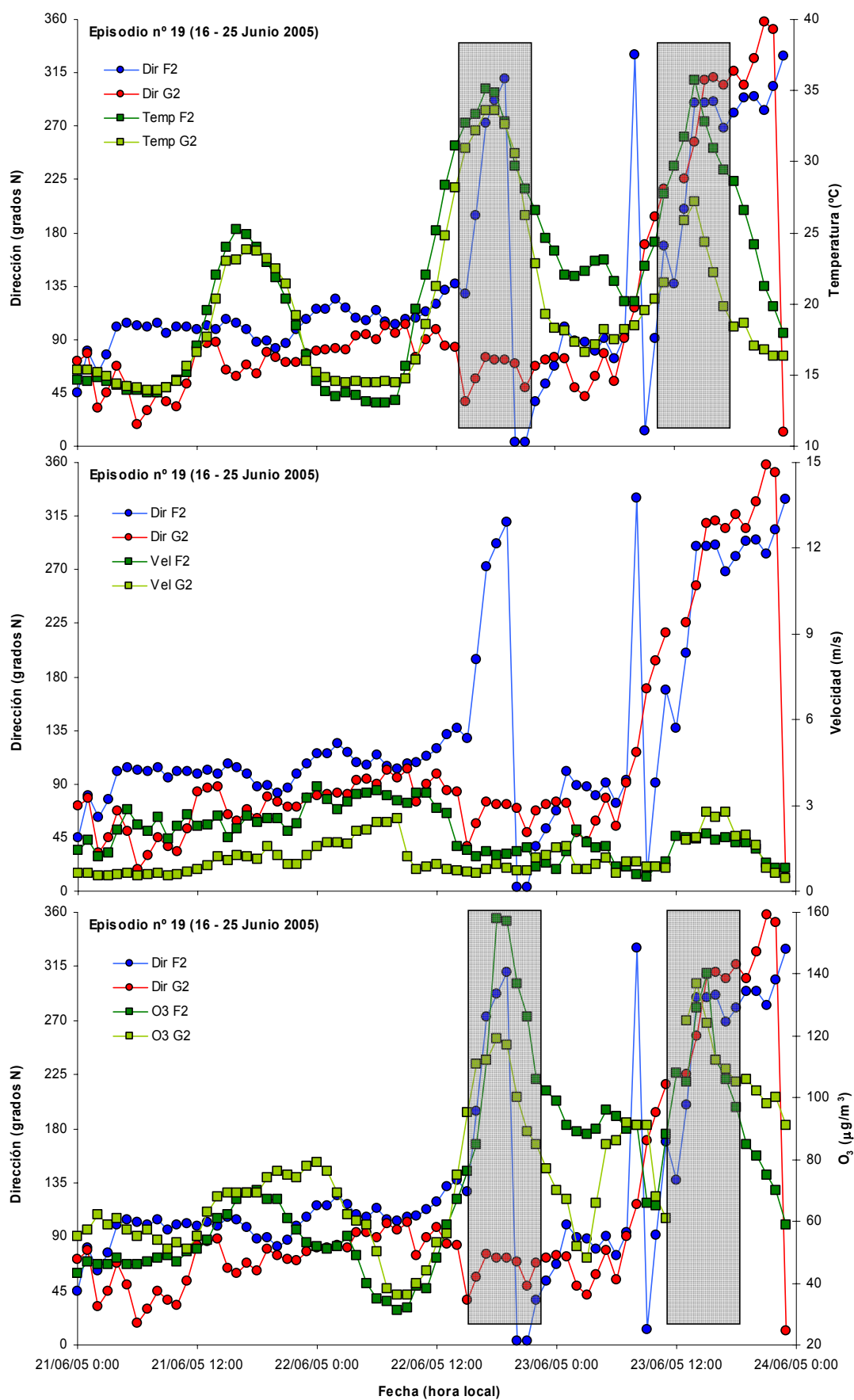
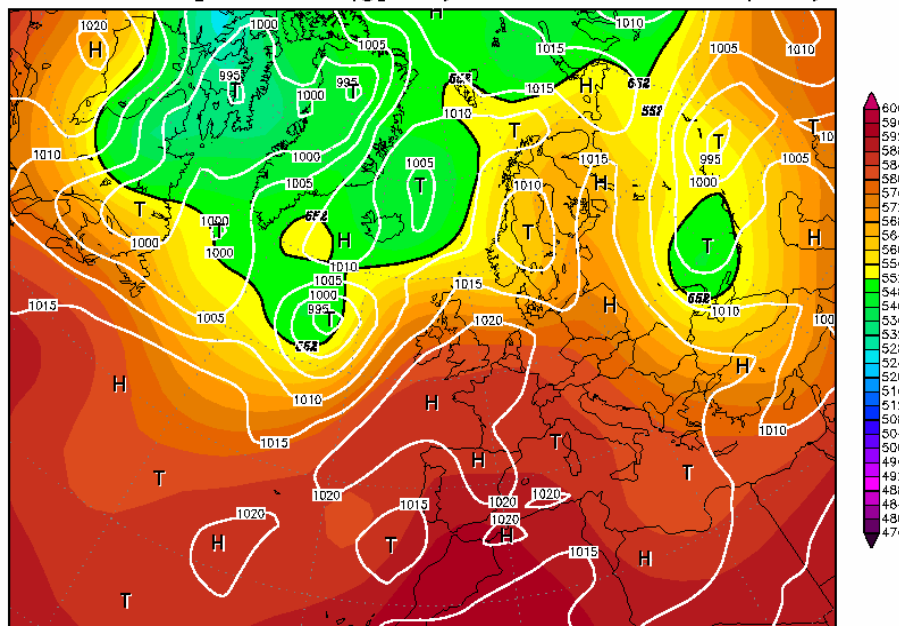


Figura 3.60: “Series temporales de dirección de viento frente a temperatura (arriba), velocidad de viento (medio) y concentración superficial de ozono (abajo) en las estaciones F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova para los tres días centrales del episodio nº 19 (16 - 25 Junio 2005)”

La meteorología local durante este período es muy semejante en ambas estaciones, con viento de componente Este hasta la tarde del día 22, cuando se registra el único hecho diferencial, el establecimiento de brisas marinas de O-NO en la estación F2, mientras la estación G2 mantiene la dirección Este. La jornada siguiente, día 23, los vientos de componente Oeste se generalizan en ambas estaciones, aunque en este caso obedecen a dos factores que actúan simultáneamente: la aparición de brisas, provocada por las altas temperaturas registradas (máximas superiores a 27°C en G2 y a 35°C en F2), y el cambio de las condiciones sinópticas, con la pérdida de intensidad del anticiclón situado el día anterior al Sur de las Islas Británicas, que provoca un flujo suave de componente NO sobre el noroeste peninsular al aumentar la inestabilidad (figura 3.61).

22JUN2005 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



23JUN2005 00Z  
500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

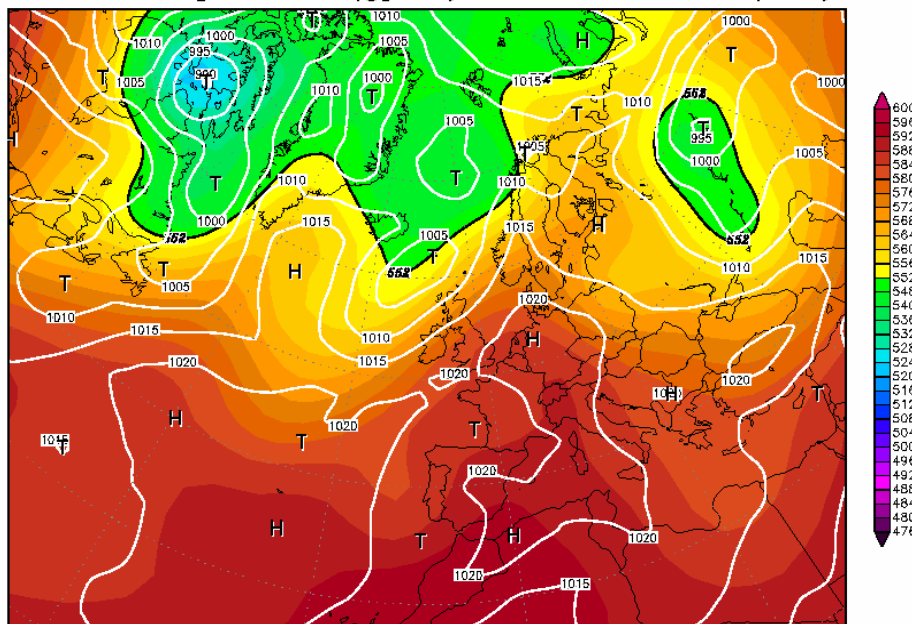


Figura 3.61: "Situación sinóptica (presión superficial y geopotencial a 500 hPa) para las jornadas 22 y 23 de Junio de 2005, días centrales del episodio nº 19 (16 - 25 Junio 2005). Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)"

El mantenimiento del viento sinóptico del Este en la estación G2 durante la jornada previa (día 22), mientras en la estación F2 se registraban brisas del Oeste, con temperaturas elevadas (más de 35 °C) y muy similares en ambas, responde probablemente a la topografía de la zona: el mayor desarrollo y la mayor frecuencia de aparición de las brisas de mar en la estación F2 es un hecho generalizado en la zona, debido al efecto de encañonamiento de las mismas por el valle del Eume, favorecidas a su vez por los vientos ascendentes de valle durante el día, mientras la estación G2-Vilanova, en una zona más llana, requiere una inercia térmica mayor para el comienzo de las brisas.

La intensidad de viento es floja en ambas estaciones (inferior a 3.5 m/s en F2 y a 2.5 m/s en G2), debido al débil forzamiento sinóptico existente, pero ligeramente superior en la estación F2, debido a su mayor altura sobre el nivel del mar y al efecto topográfico citado. La estación F2 registra una caída de la intensidad de viento al inicio del rodamiento del viento al Oeste durante la formación de la brisa el día 22, al oponerse al viento sinóptico del Este, aunque posteriormente no se recupera la intensidad al desarrollarse la brisa, debido posiblemente a la escasa duración de ésta.

Del mismo modo, las concentraciones de inmisión de óxidos de nitrógeno son similares en ambas estaciones (no mostrado), en especial la relación  $[\text{NO}_2]/[\text{NO}]$ , responsable de la concentración de ozono troposférico bajo condiciones de alta insolación.

Con estos condicionantes iniciales, se esperaría una inmisión máxima de ozono muy similar en ambas estaciones en los días 21-23, salvo quizá en los valores máximos del día 22, en el caso de que las brisas marinas representasen un papel importante en la evolución del ozono durante el episodio. Así ocurre en realidad, ya que se pueden observar concentraciones de ozono muy parejas en los dos emplazamientos, a excepción de un incremento del 33% ( $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) del máximo de ozono en F2 con respecto al registrado en G2, coincidiendo con las brisas de dirección Oeste, exclusivas de la estación F2-Fraga Redonda durante ese día 22.

Esta situación se repite en el resto de estaciones consideradas en la zona (B1-A Magdalena, B2-Louseiras y C9-Mourence), apoyando la relevancia de las brisas marinas de componente Oeste en la evolución del ozono, y el predominio de máximos episódicos de ozono en la estación F2-Fraga Redonda bajo la influencia de vientos del Oeste.

- La estación C9-Mourence registra todos los máximos episódicos bajo direcciones de viento del cuarto cuadrante (Oeste-Norte), con mayor frecuencia de las direcciones Oeste y Noroeste.

Los vientos de dirección NO también están relacionados con la aparición de brisas en la estación C9-Mourence, situada en la Terra Chá lucense, a unos 50 km de la costa, al aprovechar el pasillo formado por el valle del Eume y la depresión de As Pontes - Vilalba, entre las sierras septentrionales (Serra do Xistral) y las sierras septentrionales de la Dorsal Gallega (Serra da Cova da Serpe e Serra da Loba), debido al establecimiento de un amplio gradiente térmico entre el litoral atlántico y el interior. Los períodos en que se alcanzan los máximos en C9-Mourence con vientos del NO coinciden con formación de brisas en otras estaciones como F2-Fraga Redonda, registrándose valores máximos próximos en todas ellas (episodio nº 10, nº 24 y nº 28).

La existencia de máximos episódicos asociados a vientos del Oeste en C9-Mourence podría relacionarse con el rodamiento de la circulación sinóptica a componente Oeste, ocasionadas por el debilitamiento de las condiciones anticiclónicas dominantes, que facilitan la aproximación de vaguadas desde el Atlántico o bien la formación de bajas poco intensas en superficie; aún así no se puede descartar la influencia de las brisas, también presentes en estos períodos, al registrarse un acusado gradiente térmico entre el océano y el interior (episodio nº 21, nº 25 y otros).

- La estación B2-Louseiras representa la dualidad citada al principio de este apartado, debida a los regímenes locales de viento, por una parte, y a la circulación sinóptica, por



otra, pues los máximos episódicos registrados en esta estación se reparten entre la componente Oeste (direcciones O y SO) y Este (direcciones E y NE).

El emplazamiento de esta estación sobre una ladera, próxima a la cabecera del valle, que se abre en dirección ONO desde el ESE, favorece la aparición de vientos de montaña en esta estación, que soplarán preferentemente de componente O durante el día, ascendiendo valle arriba y por las laderas del valle, y de componente E durante el período nocturno, soplando ladera abajo y en dirección a la desembocadura del arroyo, en el fondo del valle, debido a las diferencias térmicas. Por otro lado, su altitud topográfica, 540 m, garantiza una velocidad media de viento mayor que en el resto de estaciones consideradas en la zona, situadas en cotas inferiores. Esta condición favorece el mantenimiento de la dirección de los vientos de carácter sinóptico, disminuyendo los períodos de calmas, con lo cual es sencillo establecer la dirección del viento sinóptico, aún bajo condiciones de escaso gradiente barométrico.

Debido a la citada topografía, los máximos registrados bajo vientos del E y del NE obedecen a dos situaciones diferentes:

- a) Condiciones sinópticas que provocan flujos del Este, típicas del verano gallego, como los episodios nº 6, nº 26 y nº 29 (figura 3.62), caracterizados por vientos sostenidos de semejante dirección en el resto de estaciones próximas y por concentraciones máximas de ozono que se registran durante el período diurno, bajo intensidades de viento superiores a 5 m/s.

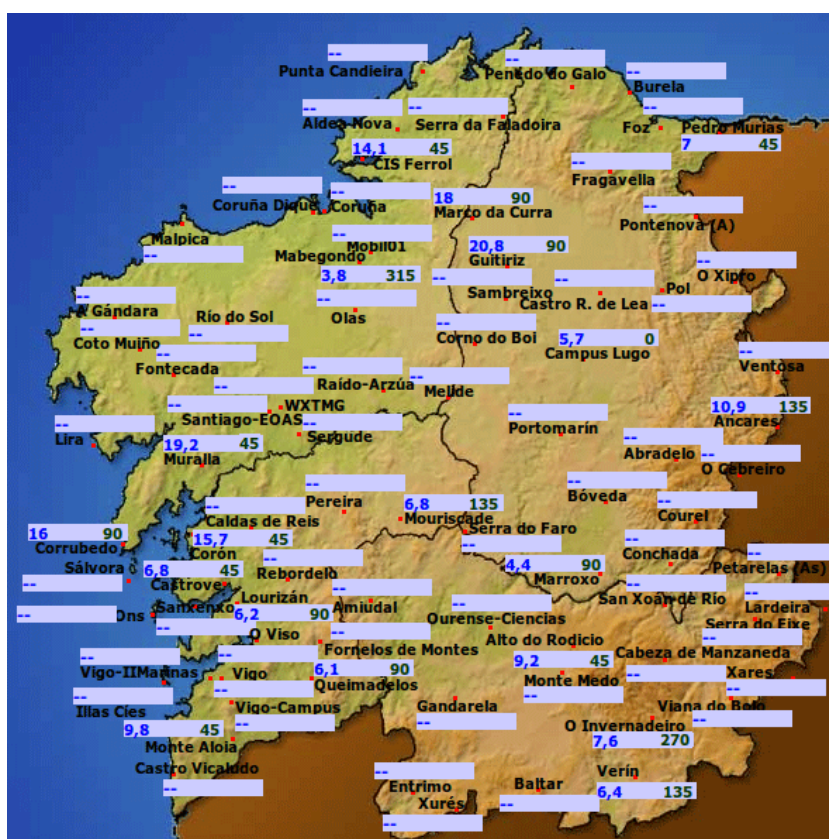


Figura 3.62: “Registros de velocidad media (izquierda, en km/h) y dirección de viento predominante (derecha, en grados Norte meteorológicos) durante el día 21 de Marzo de 2003 (jornada central del episodio nº 6) en las estaciones meteorológicas dependientes de Meteogalicia. Se observa la componente Este predominante en toda Galicia, sobre todo en aquellas estaciones con intensidades de viento superiores a 10 km/h. Fuente: Meteogalicia (2010)”

- b) Configuraciones sinópticas menos marcadas, como situaciones de “pantano barométrico” o situaciones de transición de régimen anticiclónico a ciclónico, favorables para el establecimiento de fenómenos locales de viento, tanto en la estación B2 como en estaciones próximas (brisas recurrentes en F2-Fraga Redonda, por ejemplo), y registro del valor máximo de inmisión de ozono durante la noche, como ocurre en los episodios nº 15 (figura 3.63), nº 17 y nº 30, asociado a incrementos térmicos. La elevación local de los niveles de ozono se debe en estos casos a la “rotura” de la capa estable nocturna, con la consiguiente mezcla del ozono presente en la capa superior, como ya se ha explicado con anterioridad, más que a la advección horizontal (velocidades de viento muy bajas, y dirección de viento coincidente con estaciones próximas en las que no se registra dicho repunte de ozono) o a la generación fotoquímica, dada la carencia de radiación solar.



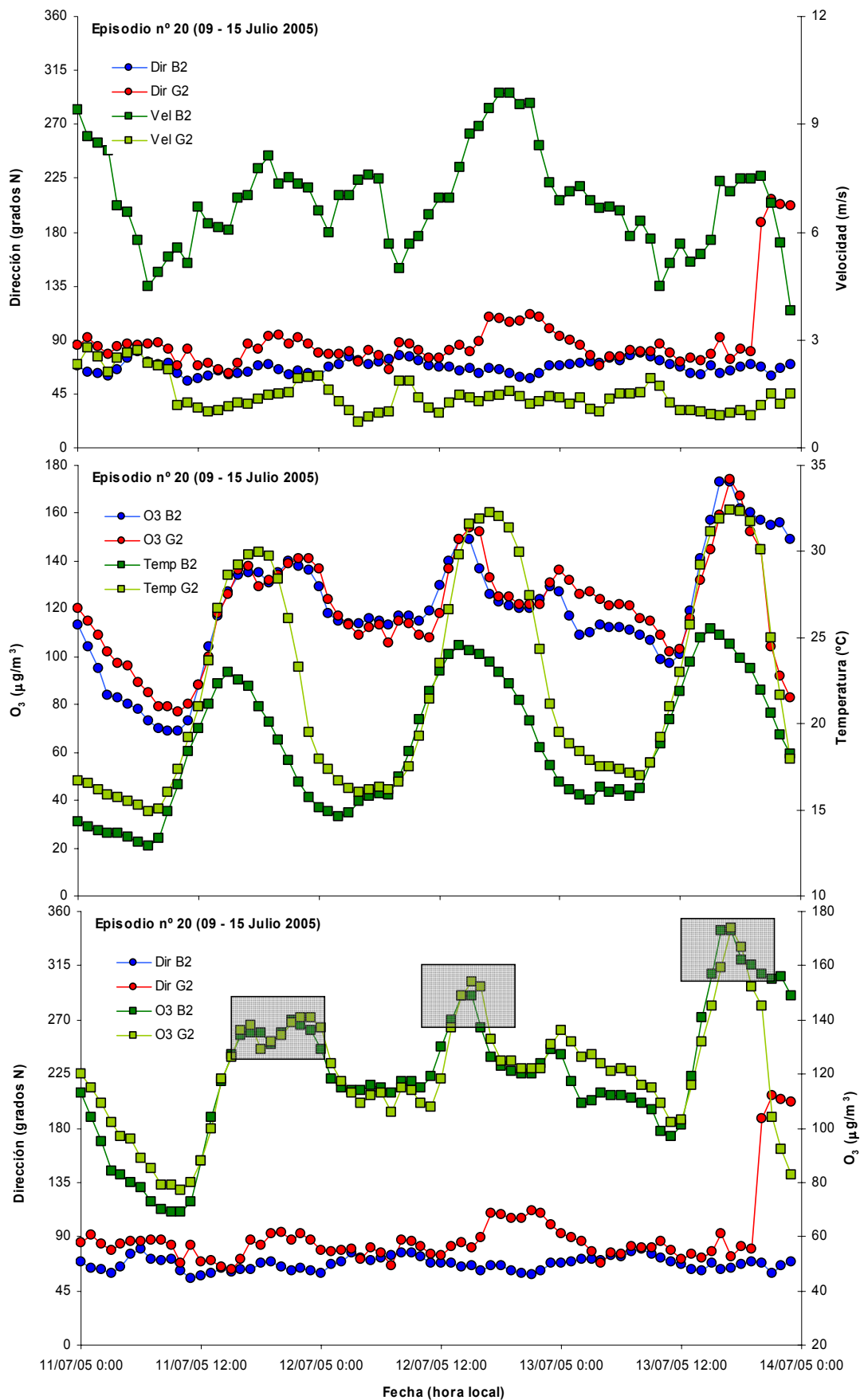


Figura 3.64: "Series temporales de dirección de viento frente a velocidad (arriba) y concentración superficial de ozono (abajo), y temperatura frente a concentración superficial de ozono (medio) en las estaciones G2-Vilanova y B2-Louseiras para los tres días centrales del episodio n° 20 (09 - 16 Julio 2005)"

- La estación G2-Vilanova presenta un porcentaje muy inferior de máximos episódicos frente a las estaciones analizadas anteriormente, con sólo un 7.4% de los mismos, frente al 37% de B2-Louseiras o al 33% de C9-Mourence. Los niveles máximos en esta estación se registraron con dos direcciones diferentes de viento, Este y Suroeste, siendo junto con B2-Louseiras la única que presenta máximos episódicos de componente Este. Se trata de la estación situada más al noroeste del área de estudio, próxima al mar y a escasa altitud (290 m), con lo cual se ve afectada por brisas marinas de SO-NO en varios episodios (nº 8, nº 12, nº 14, etc.), como el episodio nº 11 (figura 3.57), representativo de los episodios con brisas marinas, y en el cual el nivel máximo de ozono se registra en G2; por otra parte, esta situación más septentrional favorece el mantenimiento de vientos sinópticos del E-NE, menos apantallados por las sierras septentrionales que en otras estaciones, como B1-A Magdalena o C9-Mourence, como ocurre en el episodio nº 20, del 9 al 15 de Julio de 2005 (figura 3.64). Esta situación más norteña, junto con el efecto de menor protección por las sierras, es la responsable de que tanto la estación G2-Vilanova como B2-Louseiras sean las únicas en las cuales se producen máximos episódicos con viento de componente E, generalmente nórdes, que es viento sinóptico clásico de los días despejados en verano en el noroeste peninsular.

Este episodio nº 20 se caracteriza por el mantenimiento del viento sinóptico de componente Este durante todo el período y en todas las estaciones de la zona (ENE en B2-Louseiras y E en G2-Vilanova), impidiendo el desarrollo de regímenes locales (figura 3.64, arriba); ello se debe a un acusado gradiente barométrico en el noroeste peninsular, área comprendida entre el potente centro de altas presiones situado sobre las Islas Británicas y la baja relativa establecida al oeste del litoral portugués (figura 3.65).

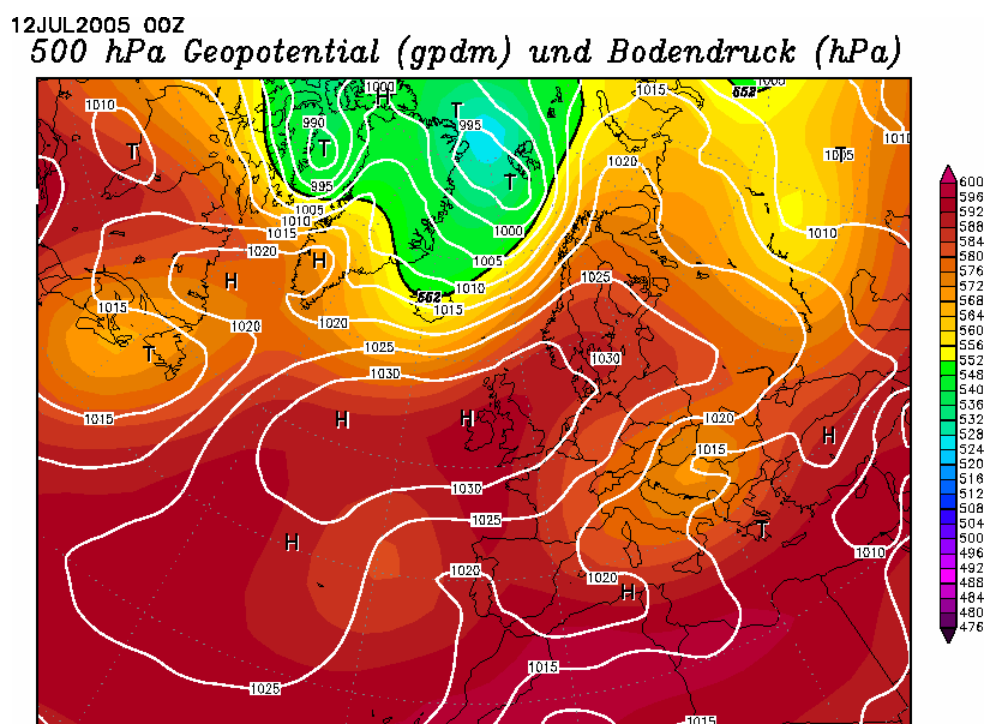


Figura 3.65: “Situación sinóptica (presión superficial y geopotencial a 500 mb) para la jornada del 12 de Junio de 2005, uno de los días centrales del episodio nº 20 (9 -16 Julio 2005). Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)”

Este intenso forzamiento sinóptico dificulta el establecimiento del régimen de brisas, a pesar de las temperaturas alcanzadas, inusualmente altas en la zona de estudio, por encima de 30 °C durante tres días consecutivos en todas las estaciones, salvo B2-Louseiras (figura 3.64, medio). Del mismo modo, la intensidad de viento registrada en la zona es muy superior a la de otros episodios, como los analizados anteriormente



(episodios nº 15 y nº 19), en los que sí se observaban fenómenos de mesoescala (figuras 3.54 y 3.60), con una velocidad de viento en B2-Louseiras superior a 5 m/s durante la mayor parte del episodio (figura 3.64, arriba).

El resultado en términos de ozono se traduce en una elevación continua de los niveles, con registros máximos de ozono troposférico prácticamente iguales en todas las estaciones durante las jornadas centrales del episodio, y una evolución muy similar de la inmisión a lo largo de todo el período, especialmente en las estaciones rurales situadas más al norte, como B2-Louseiras y G2-Vilanova (figura 3.64, abajo). Esta semejanza de concentraciones es independiente de las grandes diferencias de temperatura existentes entre algunas estaciones, como B2-Louseiras y G2-Vilanova, con más de 7 °C en las máximas diarias, lo cual puede constituir un indicio del predominio de los procesos advectivos frente a la formación fotoquímica autóctona: B2-Louseiras alcanza concentraciones máximas elevadas, e iguales a las de G2-Vilanova, a pesar de sus registros térmicos muy inferiores, que debían interferir “negativamente” en la generación fotoquímica. La gran semejanza de las concentraciones de inmisión en todas las estaciones es otro argumento favorable al posible origen advectivo del episodio, sin descartar una importante contribución autóctona.

El final del episodio también muestra algunas características interesantes, ya que el debilitamiento de la situación anticiclónica reduce el forzamiento sinóptico y contribuye a la aproximación de una pequeña borrasca relativa a las costas gallegas durante la tarde de la jornada 13, con vientos de componente Oeste. Esta nueva situación se observa horas antes en la costa occidental (estaciones F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova), con el establecimiento tardío de las brisas (simultáneo, a las 20 horas en horario local), debido a la disminución de la intensidad del nordés, y el posterior Oeste propio de la baja. Sin embargo, la estación B2-Louseiras, con una mayor intensidad del nordés, debido a su mayor cota altitudinal, y sin temperatura suficiente para el establecimiento de brisas, a pesar del debilitamiento del viento sinóptico, sigue registrando vientos de componente Este hasta las 07 horas de la jornada 14, aunque con una intensidad mucho menor, siendo esta caída de la velocidad simultánea al establecimiento de brisas en las estaciones F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova (figura 3.64, arriba). Estos cambios meteorológicos también afectan a la concentración de ozono, que disminuye apreciablemente -junto con la temperatura- en las estaciones F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova al establecerse las brisas de Oeste (figura 3.64, abajo), mientras en B2-Louseiras se mantiene en valores notablemente superiores hasta que se invierte la dirección de viento a primeras horas de la mañana del día 14. Este comportamiento parece indicar de nuevo un aporte continuo de ozono desde territorios situados al este de Galicia (Asturias y norte de Castilla-León), pues una vez interrumpido el nordés, los valores de ozono caen de forma drástica y simultánea, siendo un fenómeno común a todas las estaciones. Por tanto, parece que las masas de aire procedentes del litoral gallego están menos cargadas de ozono que las de origen oriental, a diferencia de otros episodios mencionados en los que se desarrollaban brisas, las cuales aportaban aire con mayores niveles de ozono y precursores. La diferencia entre este episodio y los anteriores radica sobre todo en esa ausencia de brisas, de modo que no se produce la citada recirculación y almacenamiento de ozono en las capas superiores, cuyo único aporte de ozono procede del Este, y al interrumpirse, los niveles de ozono disminuyen, pues el aire situado sobre la costa oeste no alcanza niveles de ozono tan elevados.

- La estación B1-A Magdalena, situada en la villa de As Pontes, muestra un comportamiento similar al de la estación C9-Mourence, con la que comparte su emplazamiento en el interior, en la depresión As Pontes - Vilalba, y por ello una rosa de vientos parecida (no mostrada), sin una clara dirección predominante, salvo el clásico nordés sinóptico, reforzado en este caso por su situación próxima al cauce del Eume, que discurre en dirección NE desde el embalse de A Ribeira, situado aguas arriba de la estación. Sin embargo, como en C9-Mourence, todos sus máximos episódicos (episodios nº 8, nº 13 y nº 32) se registran bajo direcciones pertenecientes al cuarto cuadrante (vientos del Norte, Noroeste y Oeste), lo cual apunta de nuevo al desarrollo de episodios bajo flujos de carácter mesoescalar, y no sinópticos.

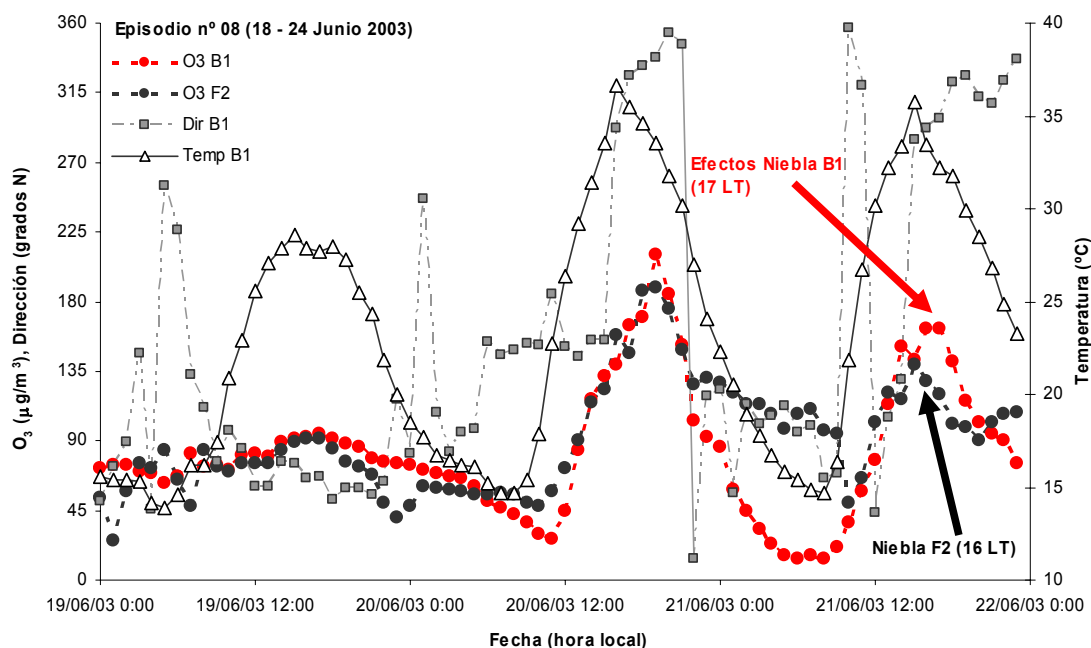


Figura 3.66: "Series temporales de inmisión de ozono, dirección de viento y temperatura registradas en la estación B1-A Magdalena y de inmisión de ozono en la estación F2-Fraga Redonda durante los días centrales del episodio n° 08 (18-24 de Junio de 2003)"

Los dos episodios (n° 8 y n° 13) con vientos de NO y N acompañando a los registros máximos son similares en cuanto a la evolución de la inmisión de ozono y a la meteorología sinóptica y local, aunque el recorrido de las trayectorias sea ligeramente diferente. El episodio n° 8 (18-27 de Junio de 2003), en el cual se alcanzan 210  $\mu g/m^3$  en B1-A Magdalena (figura 3.66), es de nuevo paradigmático sobre la influencia de la formación fotoquímica local y las brisas de componente Oeste, pues los registros de ozono se disparan con el establecimiento de las brisas, aumentando el máximo más de 100  $\mu g/m^3$  desde el día 19 al día siguiente, jornada 20, bajo condiciones meteorológicas similares; al día siguiente del máximo, se reducen sensiblemente los niveles, también bajo la influencia de las brisas y altas temperaturas, pero con entrada vespertina de nieblas en la costa (según datos de la estación de la Agencia Española de Meteorología situada en A Coruña), lo cual reduce acusadamente la generación fotoquímica. De forma significativa, los niveles de ozono en las estaciones B1-A Magdalena y F2-Fraga Redonda durante las primeras horas de la tarde del día 21, previas a la entrada de nieblas desde el oeste, superaban los registros marcados el día anterior a las mismas horas, pero el ascenso se ve frenado por los efectos de la niebla: directos en F2, próxima a la costa, e indirectos en B1, debido a la brisa. Este hecho constituye un nuevo indicio de la importancia del transporte desde el litoral occidental y de la generación fotoquímica en el área de estudio, ya que la estación B1 sufre indirectamente los efectos de la niebla en la costa (figura 3.66), a pesar de no ser directamente afectada por ella, según indican los registros de temperatura y radiación.

Como resumen general, la distribución de máximos episódicos según dirección de viento y estación de registro vuelve a resaltar la gran influencia de la topografía en la evolución de las concentraciones de ozono, a través de los vientos locales, y la existencia de un gran número de episodios en los cuales los niveles elevados de ozono se alcanzan por acumulación del mismo durante varios días consecutivos. Sin embargo, también pone de manifiesto la contribución alóctona por transporte bajo condiciones sinópticas favorables, aunque en muchos de los episodios represente un papel secundario, siendo difícil establecer un origen de esta contribución alóctona basándose exclusivamente en medidas meteorológicas.

### c) Radiación solar

El vehículo fundamental para la producción de ozono troposférico es la generación fotoquímica, a través de la radiación ultravioleta, procedente de la radiación solar incidente. Esta influencia

de la radiación solar en la concentración de ozono troposférico se traduce en una significativa correlación positiva entre ambas variables (Acero et al., 2004), siendo una variable meteorológica ampliamente utilizada en modelos paramétricos de predicción de la inmisión de ozono troposférico, aunque de menor influencia que la temperatura, según algunos autores (Acero et al., 2004; Abdul-Wahab y Al-Alawi, 2002).

Los episodios registrados en el norte de Galicia muestran también esta dependencia, desarrollándose durante períodos de cielo despejado y alta incidencia de la radiación solar; sin embargo, no se ha encontrado correlación entre los registros máximos de ozono en cada episodio y los valores de radiación solar incidente en el instante horario en que se alcanza dicho máximo (no mostrado), probablemente debido al gran número de variables implicadas en el proceso (inmisión de precursores, temperatura, procesos de transporte, etc.) y el escaso número de muestras (sólo veintisiete episodios).

A pesar de ello, se ha comparado un valor medio diurno de la concentración de ozono con un valor medio de la irradiancia solar durante el mismo período, con el fin de obtener una indicación grosera del proceso dominante en cada episodio (generación fotoquímica autóctona o transporte alóctono). Obviamente esta aproximación no permite discernir claramente entre episodios de cada uno de los dos tipos, porque la existencia de niveles elevados de ozono con valores altos de radiación solar también podría estar relacionada con el arrastre no sólo de ozono, sino también de sus precursores, que contribuirían a aumentar los registros de ozono sobre la propia área de estudio. Sin embargo, una jornada con bajos niveles locales de radiación solar y altas concentraciones de ozono podría indicar un transporte importante de ozono hacia el área de estudio.

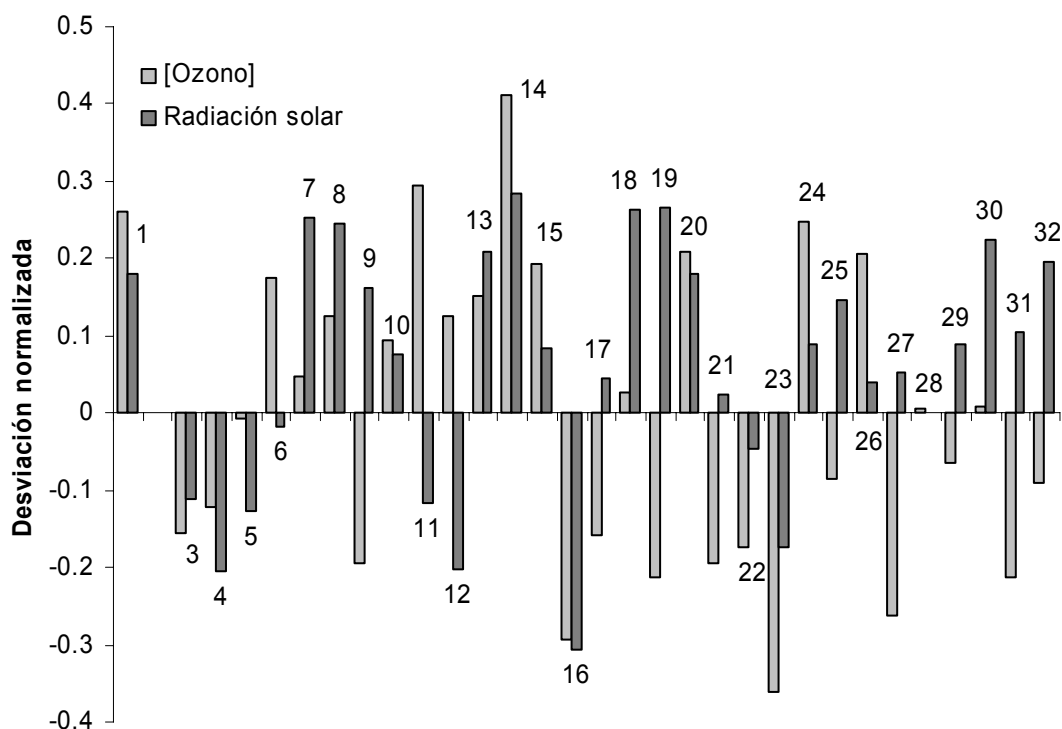


Figura 3.67: "Inmisión de ozono en la estación B1-A Magdalena y radiación solar en la estación D1-A Mourela para 31 de los 32 episodios seleccionados. Los registros de ozono se representan como la desviación normalizada respecto a la media de los 31 episodios citados, mientras los registros de radiación se calculan como la desviación normalizada frente al percentil 30% de los 31 episodios: en cada episodio, los valores de ozono y radiación se han calculado como valor promedio de los diez registros horarios entre las 08 UTC y las 17 UTC del día en que se alcanza el máximo episódico de ozono; posteriormente para cada episodio se normalizan respecto a la media de los 31 episodios y se representa su desviación frente a la unidad. En el caso de la radiación, los valores promedio se normalizan respecto al percentil 30% y se representa su desviación frente a la unidad "

Esta comparación se ha realizado utilizando los valores de inmisión de ozono troposférico y de radiación solar registrados entre las 08 UTC y las 17 UTC para 31 de los 32 episodios analizados, en las estaciones B1-A Magdalena y D1-A Mourela, respectivamente. Ambas estaciones distan menos de 1500 m, de modo que se puede asumir que los valores de irradiancia son representativos del entorno de B1-A Magdalena, estación en la cual se mide el ozono troposférico. Se ha elegido el citado intervalo diurno de diez horas de duración para calcular los valores medios pues comprende el período de ocho horas en el cual los valores de ozono comienzan a ascender y alcanzan su máximo (07 UTC - 15 UTC), según se ha comprobado en análisis previos (apartado 3.4.3, sobre variabilidad diaria del ozono troposférico), más las dos horas siguientes, durante las cuales los valores de ozono se mantienen muy próximos al nivel máximo.

Los resultados de la comparación se muestran en la figura 3.67. Realizando un análisis muy conservador, dadas las incertidumbres asociadas (temperatura, velocidad y dirección de viento, emisiones locales, etc.), se puede extraer como conclusión que en algunos episodios la contribución del transporte de ozono hacia el área es importante: se trata de aquellos episodios en los cuales el promedio de ozono en esas diez horas sea superior al promedio de episodios en su conjunto, mientras el promedio de radiación solar sea inferior al percentil 30% de los episodios en global (criterio de “radiación solar baja”). Este es el caso de los episodios nº 6, nº 11 y nº 12, ya que los elevados valores de ozono alcanzados se registran bajo condiciones de escasa radiación solar. De este análisis no se puede derivar que el resto de los episodios no presentan influencia del transporte, pues además de los aportes de ozono transportado desde otras áreas, se pueden transportar precursores, que contribuirían a la formación de ozono en el área; además otros episodios, como el nº 24 y el nº 26, presentan niveles de ozono muy superiores a la media, bajo una radiación solar próxima a los considerados como niveles bajos, y no se han considerado debido al conservadurismo del criterio impuesto.

El episodio nº 6 (16-24 de Marzo de 2003) es representativo de la influencia del transporte alóctono, según indican los datos meteorológicos recogidos en la figura 3.68:

- Los registros máximos diarios de ozono son muy próximos en las estaciones situadas más al Este (B1-A Magdalena, B2-Louseiras y C9-Mourence), ligeramente superiores a los de las estaciones más occidentales (F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova), destacando la elevación suave y continua de la inmisión hasta la tarde del día 21, con un acusado mantenimiento de la concentración durante la noche (figura 3.68, arriba), incluso en estaciones de carácter suburbano situadas en zonas llanas de baja altitud, como C9-Mourence, lo cual puede considerarse indicativo de la presencia de ozono transportado (Danalatos y Glavas, 1996; Gangoiti et al., 2002).
- El viento se mantiene constante de componente Este durante todo el episodio hasta alcanzar la inmisión máxima de ozono (figura 3.68, abajo), salvo en algunos períodos en las estaciones B1-A Magdalena y C9-Mourence, con dirección variable debido a su escasa intensidad. No se producen brisas ni fenómenos locales de viento, con lo que el flujo del Este no se interrumpe a lo largo del episodio.
- La intensidad de viento no es uniforme en todas las estaciones, dada su diferente situación topográfica, pero sí es elevada para un episodio con altos niveles de ozono: la estación B2-Louseiras registra velocidades sostenidas por encima de 4 m/s, incluso durante la noche, y puntas superiores a 8 m/s, alcanzándose el máximo de ozono con un valor de 6.7 m/s, casi 25 km/h (figura 3.68, medio). El resto de estaciones muestran velocidades inferiores, pero aún así este episodio es el que transcurre con mayor intensidad de viento de todos los analizados.
- Las temperaturas registradas son muy suaves en toda la región, con máximas inferiores a 19 °C, e incluso a 12 °C en la estación B2-Louseiras, en la cual se alcanza el máximo (figura 3.68, arriba), coherente con los bajos niveles de radiación medidos con respecto a la mayoría de episodios.



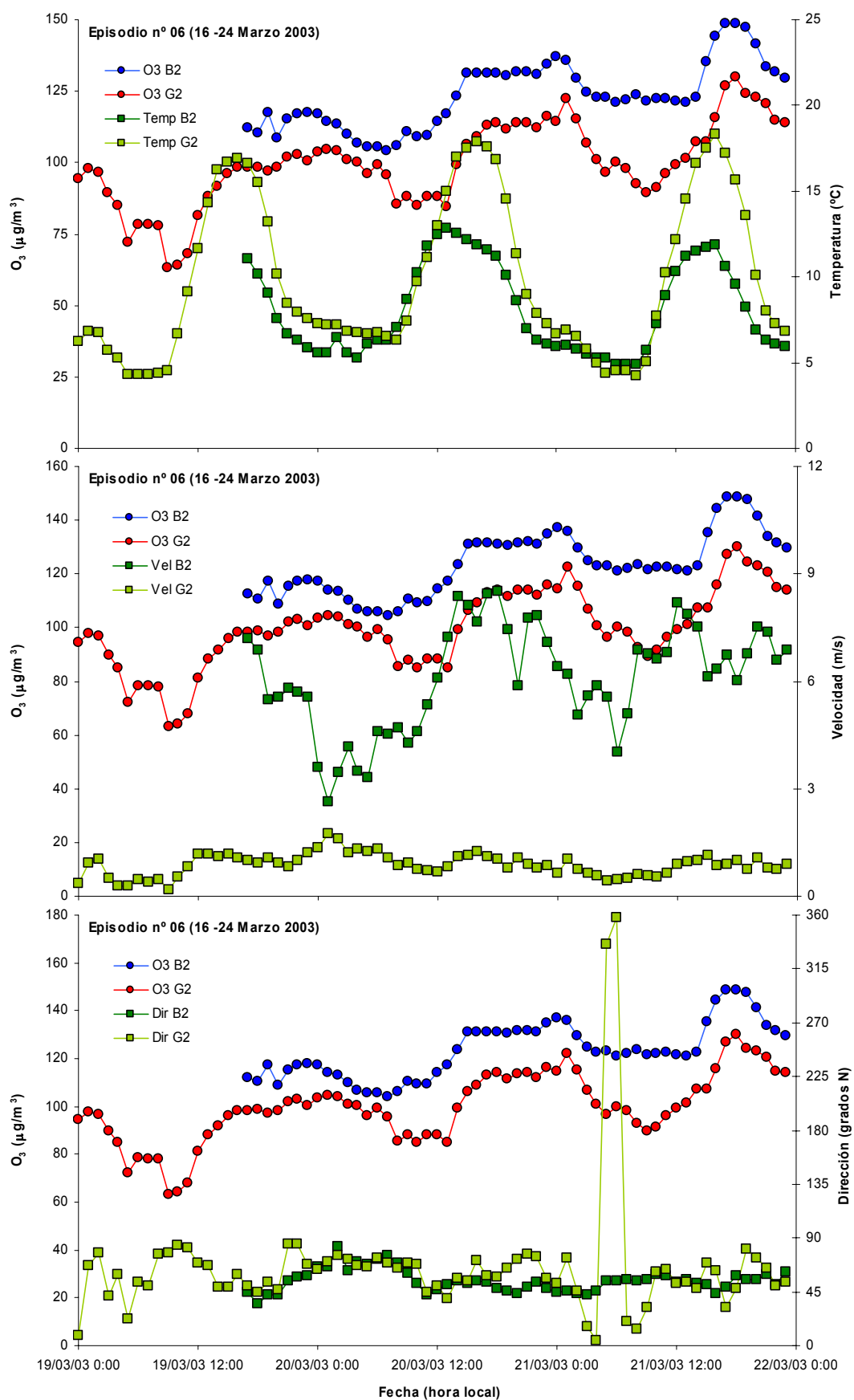


Figura 3.68: "Series temporales de concentración superficial de ozono frente a temperatura (arriba), velocidad de viento (medio) y dirección de viento (abajo) en las estaciones B2-Louseiras y G2-Vilanova para los tres días centrales del episodio n° 06 (16 - 24 Marzo 2003)"

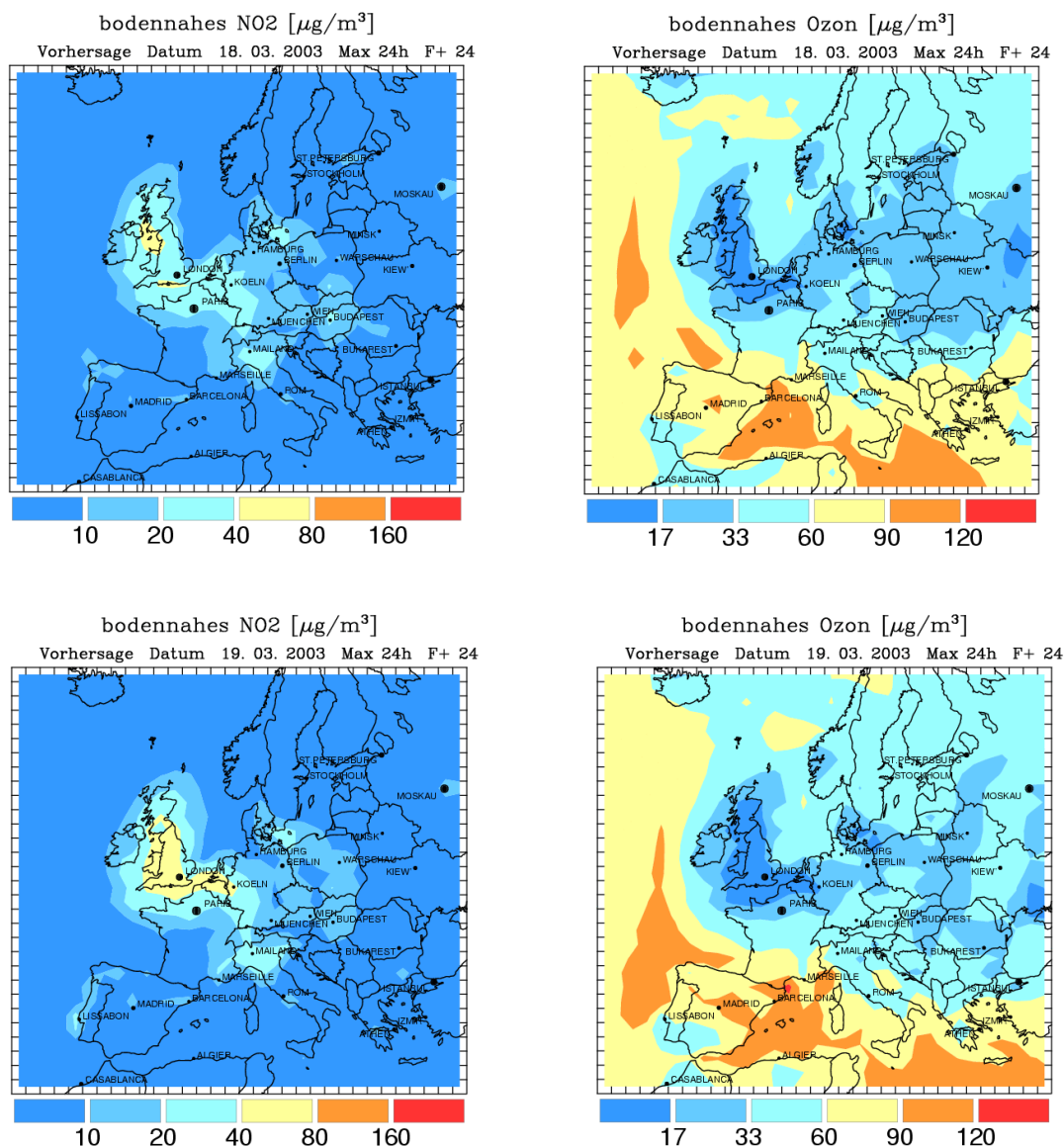


Figura 3.69: “Promedios diarios de concentración superficial de dióxido de nitrógeno y ozono troposférico sobre Europa, simulados por el modelo EURAD para los días 18 y 19 de Marzo de 2003, pertenecientes al episodio nº 06 (16 - 24 Marzo 2003). Fuente: Rhenish Institute for Environment Research, 2010”

- La simulación de trayectorias apoya la hipótesis de transporte de ozono alóctono, mostrando un flujo intenso desde el centro-norte de Francia, que penetra por el litoral Cantábrico hasta alcanzar el norte de Galicia en dirección Este (figura 3.33). Los radiosondeos sobre A Coruña, próxima a la zona de estudio, confirman la dirección de viento E-NE en altura (figura 3.70), así como inversiones de subsidencia anticiclónica durante el episodio, que facilitan la acumulación de ozono, al dificultar la renovación de estas masas de aire. Esta situación favorece la entrada de masas de aire con elevada concentración de ozono, como indican las simulaciones del modelo EURAD de calidad de aire: durante el episodio, masas enriquecidas en ozono troposférico sobre el golfo de Vizcaya se van desplazando en dirección nordeste, afectando a la cornisa Cantábrica y a Galicia; estas masas enriquecidas en ozono se forman sobre el mar Cantábrico a partir de

los precursores emitidos en el noroeste de Francia, los Países Bajos y el sur de Inglaterra, según se observa en la figura 3.69.

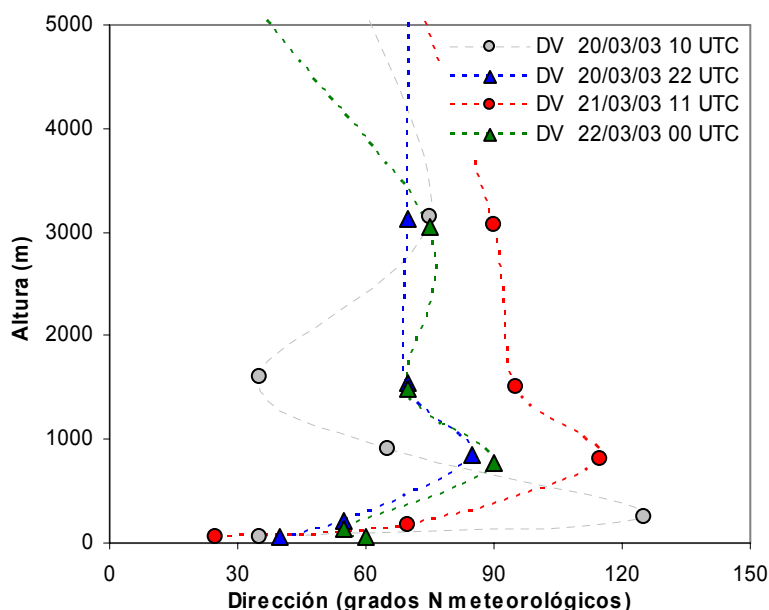


Figura 3.70: “Perfiles verticales de dirección de viento durante el período 20-22 de Marzo de 2003 (episodio nº 06), mostrando la dirección ENE-E predominante en altura. Los datos proceden de los radiosondeos lanzados desde el Centro Meteorológico Territorial de A Coruña (Agencia Española de Meteorología), con coordenadas 43.37 N y 8.41 W. Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2008”

Además de los tres episodios citados, que representan el 9.7% de los episodios analizados, y parecen presentar una clara contribución de ozono alóctono, este análisis muestra resultados coherentes con lo esperado, ya que el 61.3% de episodios se sitúa dentro de los márgenes esperados (es decir, un 41.9% de casos caracterizados por niveles “normales o altos” de radiación solar, superior al percentil 30%, con ozono asociado superior a la media, más un 19.4% de episodios con radiación solar “baja”, inferior al percentil 30%, e inmisión de ozono troposférico por debajo del valor medio). Los nueve episodios restantes, correspondientes al 29.0% del total, se caracterizan por registrar niveles de ozono inferiores a la media, a pesar de los elevados registros de radiación solar.

#### d) Precipitación

La precipitación es una variable meteorológica con escasa influencia durante los períodos con altos niveles de ozono troposférico, pero se hace una breve referencia a ella en este estudio por dos razones, como son su utilidad para marcar la terminación de algunos episodios, y su posible relación con fenómenos tormentosos indicativos de gran inestabilidad atmosférica.

En el primer caso, la precipitación puede utilizarse para establecer el final de un episodio, al indicar un cambio acusado de las condiciones sinópticas, pasando de una situación sinóptica estable, de carácter anticiclónico, a condiciones ciclónicas, desfavorables para la formación de ozono, dado el incremento de la nubosidad, la limpieza mecánica por incremento de intensidad de viento y el aumento de la eliminación de ozono por deposición húmeda.

Por otra parte, un reducido número de episodios transcurre con pequeñas cantidades de lluvia recogidas en torno a los días centrales de los mismos. En general, están relacionados con la aparición de tormentas estivales, favorecidos por una gran inestabilidad atmosférica, que facilita la mezcla del ozono existente en capas superiores de la atmósfera.

### 3.5.5 Análisis de las medidas de inmisión

La sección 3.5.5 resume las principales características analizadas en relación con la inmisión de ozono troposférico y óxidos de nitrógeno en las estaciones de la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa - As Pontes, así como las similitudes de su evolución y comportamiento con respecto a otras estaciones consideradas, como las estaciones EMEP y estaciones rurales del norte de Portugal.

Se ha realizado un análisis cualitativo para cada uno de los episodios identificados, simultaneándolo con el análisis sinóptico y meteorológico, siendo su objetivo último la determinación de la causa principal del episodio (autóctono, es decir, debido a generación fotoquímica local de ozono, o alóctono, provocado por el transporte de ozono desde zonas alejadas al entorno analizado, considerando como tales los territorios ajenos a la Comunidad Autónoma de Galicia).

Este análisis se ha basado en la comparación conjunta de las series de ozono y óxidos de nitrógeno, y de ambas con series meteorológicas de temperatura, viento (intensidad y dirección), radiación solar y precipitación, ya que las características de inmisión sólo pueden ser interpretadas correctamente a partir de los datos meteorológicos, según se ha mostrado en los ejemplos de la sección 3.5.4.

Se han incluido en el análisis algunas propiedades semicuantitativas, destinadas a caracterizar someramente el tipo de evolución de la inmisión, separando los períodos diurnos y nocturnos, según se describe a continuación.

#### *Criterios*

##### a) Período nocturno

Se ha establecido como “nocturno” el período de seis horas comprendido entre las 23 UTC y las 04 UTC, durante el cual la radiación solar es nula durante los meses de verano. No se han considerado las primeras horas sin luz (21-22 UTC) para poder partir de niveles de ozono nocturno ya “estabilizados”. Este período se ha modificado para los episodios que tienen lugar en Marzo, Abril y Octubre, considerándose en este caso entre las 22 UTC y las 06 UTC, debido a la diferente distribución diaria de la luz solar y a la mayor duración del intervalo nocturno.

Aunque en el análisis cualitativo inicial se han considerado todas las estaciones disponibles, únicamente se han seleccionado dos de ellas para reflejar las características de este período, la estación B2-Louseiras y la estación que hubiese registrado el máximo de ozono durante el episodio en cuestión. La elección de B2 - Louseiras como estación de referencia para el análisis de los períodos nocturnos obedece a su situación topográfica, muy próxima a la cima de un monte, y a su mayor altitud, 540 m, lo que favorece el desarrollo de fenómenos de persistencia y aumento de ozono durante la noche, según se observó durante el análisis cualitativo de los episodios. Esta estación puede considerarse un indicador fiable de los niveles de ozono presentes en capas superiores de la atmósfera durante la noche, por encima de la capa estable nocturna, pues es bastante frecuente el desarrollo de inestabilidad nocturna sobre ella, provocando la mezcla de ozono acumulado en niveles superiores, según se pone de manifiesto en las series de inmisión y de temperatura, con notables y repetidos aumentos térmicos durante la noche. Por otro lado, su carácter rural convierte a esta estación en un elemento clave para describir los niveles de ozono típicos en el área de estudio. La elección de la estación que registra los mayores niveles horarios del episodio parece obvia, para establecer el máximo episódico y describir su posible relación con los valores nocturnos.

La descripción del comportamiento de los niveles de ozono durante la noche se considera relevante para la detección de posibles fenómenos de transporte o de acumulación de ozono, ya que la formación fotoquímica está inhibida durante este período: los principales fenómenos que pueden afectar a los niveles de inmisión de ozono son la deposición seca y el consumo por monóxido de nitrógeno, disminuyendo su concentración atmosférica, y el transporte, advectivo y vertical (en el caso de una débil capa estable nocturna), favoreciendo la acumulación de ozono y el aumento de inmisión.

Los índices establecidos para este período se han basado en la presencia de máximos nocturnos de concentración de ozono, tanto absolutos (máximo episódico) como relativos, considerados en este caso como incrementos superiores a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante algún subperíodo dentro del segmento nocturno. A un nivel más general, se ha considerado la existencia de persistencia de los niveles de ozono durante la noche si la reducción de los niveles de ozono troposférico entre las 23 UTC y las 04 UTC es inferior al 10%. La detección de persistencia sólo se ha realizado para la madrugada del día en que se alcanza el máximo episódico, pero la existencia de máximos nocturnos se ha extendido también a la jornada previa.

#### b) Período diurno

Los períodos diurnos de ozono presentan una caracterización más compleja, dada la mayor complejidad y diversidad de los procesos que intervienen, tanto para la generación como la destrucción, destacando la influencia de la meteorología y la disponibilidad de precursores. Esta relación se ha intentado determinar con el citado análisis cualitativo de cada episodio, limitándose la descripción cuantitativa diurna a dos factores: el número de días consecutivos con concentraciones máximas horarias superiores a  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , considerando todo el período, tanto diurno como nocturno, y el tipo de aumento de los niveles de ozono durante la jornada que marca el máximo y las dos jornadas previas.

Este último criterio se basa una vez más en los niveles máximos horarios registrados durante el día, de modo que se distinguen varios tipos de episodios en función de la evolución de dichos máximos:

- los episodios “progresivos” se consideran aquellos en los cuales los máximos diarios registran dos aumentos consecutivos, desde la jornada D-2 hasta la jornada D, siendo la jornada D la que presenta el máximo episódico. Por el contrario, los episodios de carácter “puntual” muestran crecimiento del nivel máximo de ozono durante la jornada D, registrándose un descenso entre la jornada D-2 y la jornada D-1.
- la intensidad de esta variación de niveles máximos de ozono se ha definido como “suave” si es inferior al 25%, “media” si no supera el 50% y “acusada” si es mayor de este 50%.

El período diurno para este segundo criterio comprende desde la 05 UTC hasta las 22 UTC, en período estival (Mayo-Septiembre), mientras que en el resto del año se considera desde las 07 UTC a las 21 UTC, y sólo se estudia, de nuevo, en la estación que muestra el máximo horario y la estación B2-Louseiras, para poder compararla con el comportamiento nocturno. Sin embargo, una vez clasificados los episodios en función de la serie de inmisión propia de la estación que registra el máximo episódico, se ha optado por analizar su comportamiento diurno en una única estación, F2-Fraga Redonda, que se puede considerar de carácter rural. Esto permite obtener una mayor coherencia en la caracterización de los episodios, disminuyendo la dependencia existente entre las características de inmisión del episodio y la estación en que se alcanza el nivel máximo episódico, pues la serie de inmisión es muy dependiente de la topografía local y las fuentes emisoras cercanas.

#### *Conclusiones*

Las principales conclusiones derivadas del análisis anterior se muestran a continuación:

#### a) Período diurno

##### a1) Episodios puntuales

Los episodios “puntuales”, que se producen tras un descenso previo de los niveles de ozono durante la jornada anterior, suponen sólo el 16 % de los 32 episodios analizados (episodio nº 1, nº 3, nº 10, nº 28 y nº 32), y se caracterizan por un brusco ascenso de la concentración de ozono, que incluso llega a duplicar los registros máximos de la jornada previa, como ocurre en los episodios nº 3 y nº 32.

Parece probable que este tipo de episodios tengan una apreciable contribución autóctona en los niveles de ozono registrados, dado el importante incremento de la inmisión de ozono en un corto período temporal: la emisión de precursores en el área estudiada, junto con unas condiciones meteorológicas favorables, podría explicar estos aumentos intensos de un modo más sencillo que recurriendo a la hipótesis del transporte de ozono desde zonas alejadas, más acorde con los incrementos paulatinos y más suaves de ozono.

Esta clase de episodios presentan pocas características comunes en cuanto a la situación sinóptica o el origen espacial de trayectorias, pues es suficiente con que la meteorología sea favorable (altas temperaturas, escasa intensidad de viento, cielos despejados, estabilidad alta, etc.), lo cual puede ocurrir bajo varias configuraciones diferentes. Aún así, las más frecuentes son las “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, sobre todo, y el “Pantano barométrico”, ya que suelen originar el tipo de tiempo citado, con marcadas olas de calor en el primer caso.

Por otra parte, el comportamiento nocturno (figura 3.71 y 3.72) en estos episodios es lineal (al menos en la noche previa a que se alcance la inmisión máxima), con una importante disminución de los niveles de ozono durante la noche (nula o baja persistencia nocturna de ozono), ya que la emisión de precursores como óxidos de nitrógeno y la alta estabilidad provocan la destrucción del ozono en las horas sin radiación solar.

Existe otro grupo de episodios semejantes a éstos, compartiendo un aumento explosivo de la concentración en el día en que se registra el máximo, pero que ya indican un pequeño aumento incipiente de inmisión de ozono durante la jornada previa (episodios nº 8, nº 9 y nº 19). Estos casos se engloban también dentro de los episodios de carácter puntual, pues el incremento previo de los niveles de ozono no es relevante con respecto al producido el día con los valores más altos, que duplica los valores previos en algunos casos (aumentos superiores al 120% en los episodios nº 8 y nº 19).

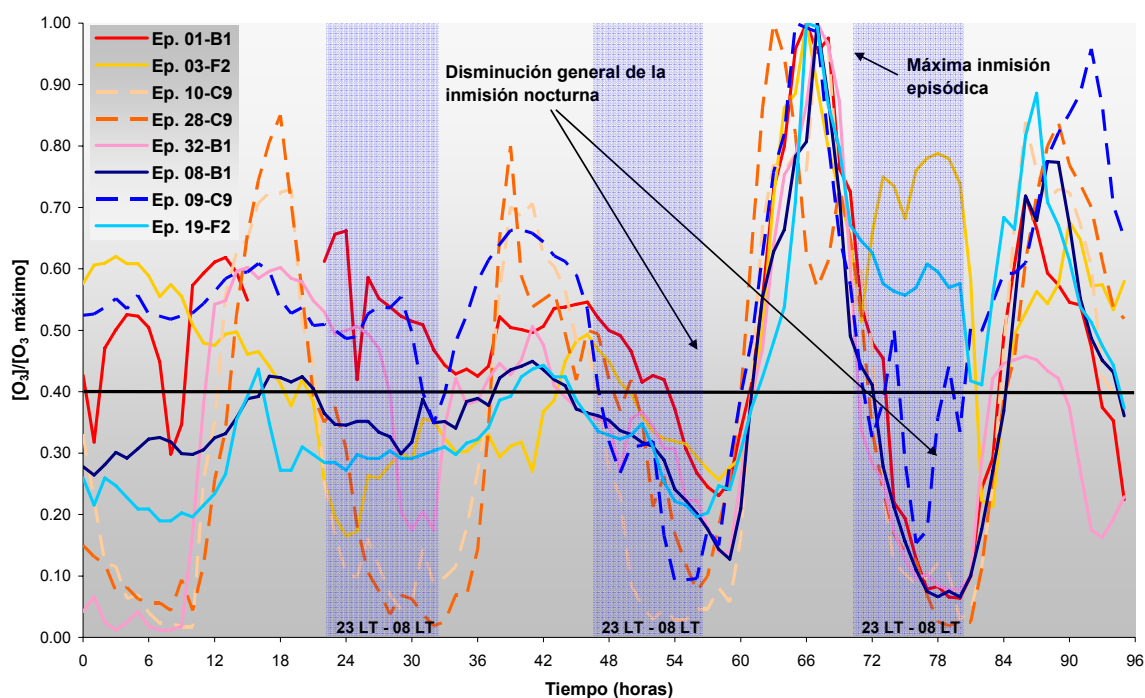


Figura 3.71: “Series temporales de concentración superficial de ozono relativa a la concentración máxima registrada en el episodio, representadas para los episodios de carácter puntual en la estación de medida que alcanza dicha concentración máxima, indicada en la leyenda. Se representa la jornada que registra el máximo valor de ozono troposférico, las dos jornadas previas y la jornada posterior”

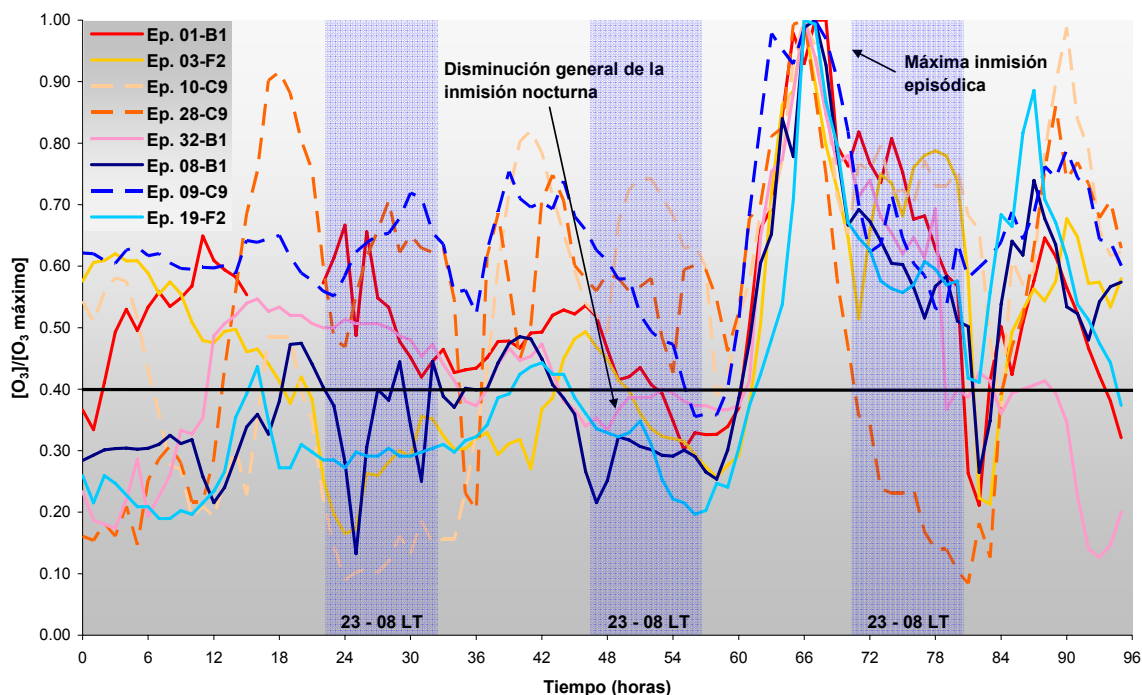


Figura 3.72: “Series temporales de concentración superficial de ozono relativa a la concentración máxima registrada en el episodio, representadas para los episodios de carácter puntual en la estación F2-Fraga Redonda. Se representa la jornada que registra el máximo valor de ozono troposférico, las dos jornadas previas y la jornada posterior. La leyenda indica el número de episodio y la estación que registra el máximo de inmisión de ozono troposférico, pero las series pertenecen a la estación F2-Fraga Redonda”

La meteorología local de todos estos episodios se caracteriza por fuertes ascensos térmicos: en general, ascenso mínimo de 5 °C en temperaturas máximas, aunque hay excepciones, como en el episodio nº 10, con mantenimiento de las máximas, y el episodio nº 28, con una disminución de 3 °C en el registro máximo. El incremento térmico es directamente proporcional al aumento porcentual de los niveles máximos de ozono, siendo representativos los episodios nº 10 y nº 19: sin modificaciones en la temperatura máxima en el primer caso, y aumento del 41 % en el nivel máximo de ozono, mientras el segundo se caracteriza por un incremento térmico superior a 10 °C, acompañado de un aumento porcentual del 126 % en la concentración máxima de ozono. Las altas temperaturas registradas durante la jornada con valores máximos es otra cualidad propia de este tipo de episodios, con temperaturas máximas por encima de los 30 °C en la mayoría de ellos.

La dirección predominante de viento durante estos episodios puntuales es E-SE, con establecimiento de brisas marinas del O-NO durante la tarde, debido al intenso gradiente térmico tierra-mar y a la escasa intensidad del viento sinóptico.

El episodio nº 32 (01-06 de Agosto de 2007) puede considerarse como representativo de este grupo de episodios puntuales. La figura 3.73 recoge las series meteorológicas y de inmisión de los tres días centrales del episodio, en los cuales se observa el importante aumento térmico en la jornada del 4 de Agosto, en la que se registra la máxima inmisión horaria del episodio: incremento generalizado de temperatura en el noroeste peninsular (como ejemplo, los 6° C de G2-Vilanova y los 12 °C de B2-Louseiras, según se observa en la figura 3.73), debido a las altas presiones atlánticas en superficie y a la dorsal anticiclónica en altura, cuyo vértice se sitúa sobre el norte peninsular (figura 3.74).



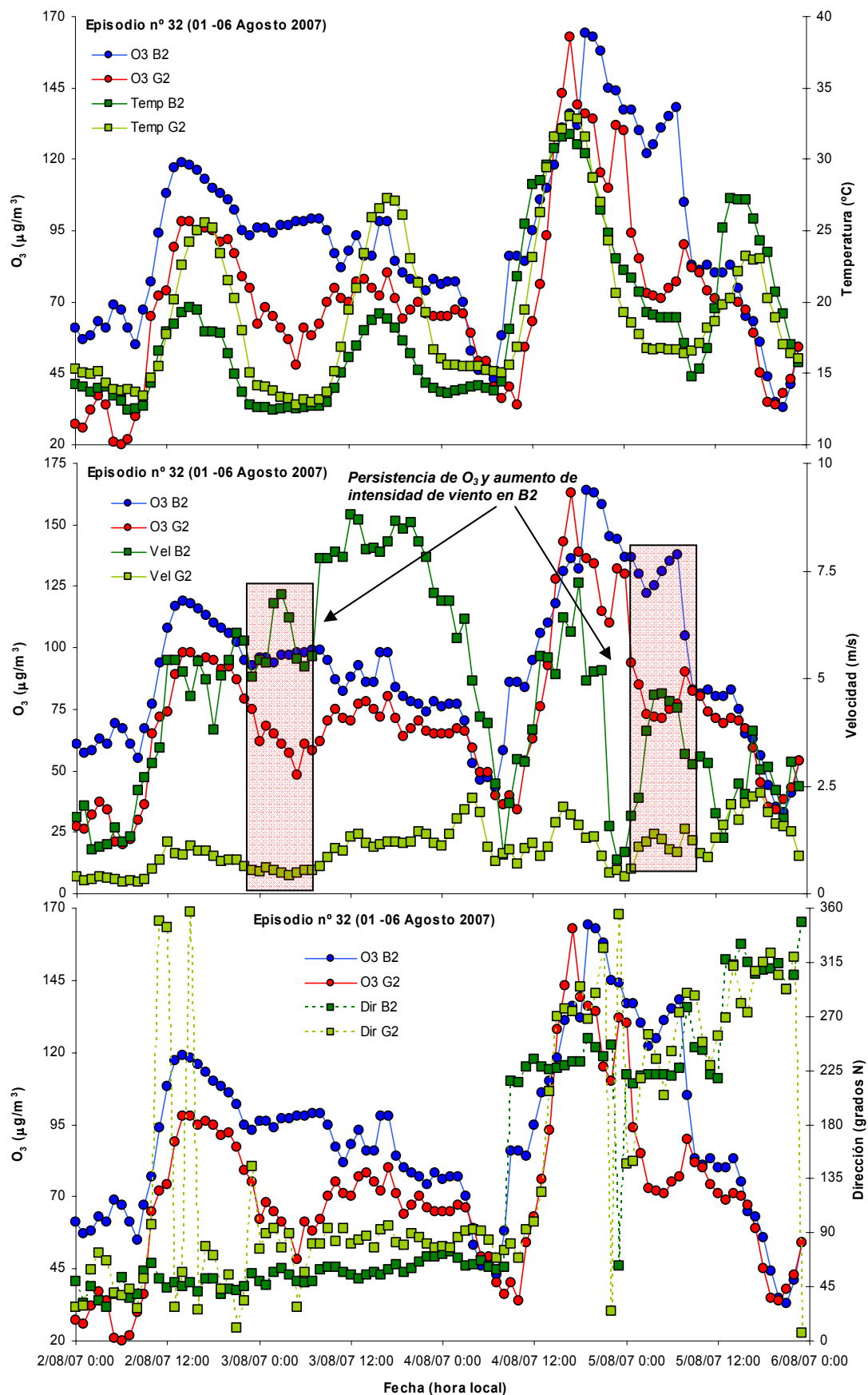


Figura 3.73: "Series temporales de concentración superficial de ozono frente a temperatura (arriba), velocidad de viento (medio) y dirección de viento (abajo) en las estaciones B2-Louseiras y G2-Vilanova para los tres días centrales del episodio n° 32 (01 - 06 Agosto 2007)"



04AUG2007 00Z

### 500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

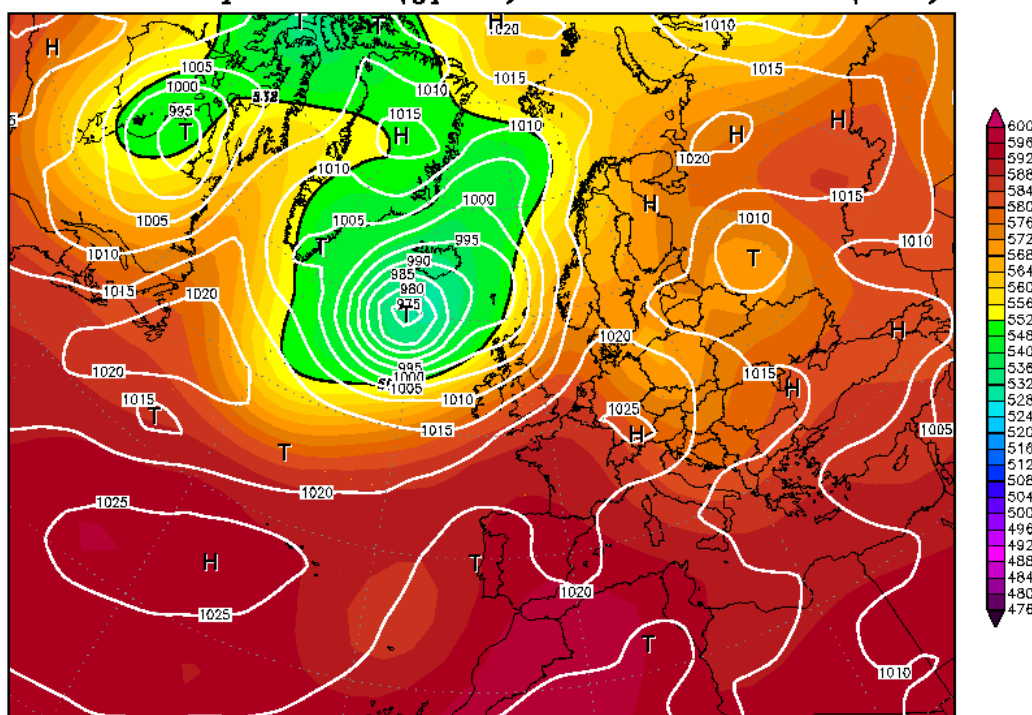


Figura 3.74: “Mapa sinóptico de superficie y a 500 hPa para el día central del episodio nº 32 (01-06 de Agosto de 2007, mostrando una configuración de ‘Altas presiones sobre el Atlántico y Europa’, destacando el débil gradiente bórico sobre la península Ibérica y la dorsal africana en altura que provoca elevadas temperaturas. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)”

La figura 3.73 presenta tres factores con clara influencia en los valores de inmisión de ozono troposférico registrados:

- Las temperaturas excepcionalmente altas alcanzadas en el área de estudio la jornada del 4 de Agosto, que contribuyen a intensificar los procesos de formación fotoquímica del ozono, con máximas entre 32 °C y 36 °C en las estaciones analizadas en el norte de A Coruña.
- Los niveles nocturnos de ozono experimentan un acusado descenso durante la madrugada del día 4 en ambas estaciones, mucho más pronunciado que en la madrugada previa (día 3) y posterior (día 5), lo cual está relacionado con el incremento de la estabilidad nocturna durante el día central del episodio, característica típica de los episodios de carácter puntual, como se ha comentado previamente. Sin embargo, salvo en la madrugada de la jornada 4, en que se alcanza el máximo episódico, se observan diferencias significativas en la inmisión de ozono nocturno entre la estación B2-Louseiras, con persistencia nocturna, y G2-Vilanova, con disminución clara de la inmisión nocturna: este fenómeno obedece a la orografía de B2, situada en una zona más elevada (250 m por encima de G2), y afectada por una capa estable nocturna más débil, lo cual impide la deposición seca y el consumo de ozono por monóxido de nitrógeno, al mantener la mezcla vertical activa. Es notorio el aumento de intensidad de viento durante las madrugadas de los días 3 y 5 en la estación B2, coincidiendo con un mantenimiento y repunte respectivo de la inmisión de ozono, comportamiento opuesto al observado en G2. La carencia de medidas en altura sobre cada una de las estaciones impide comprobar si estas diferencias derivan en efecto de la inestabilidad mecánica, aunque la figura 3.75, que representa el número de Richardson sobre la estación D1-A Mourela, también apunta en dicha dirección: dicha estación D1 está situada muy próxima a B1-A Magdalena, y a una altitud similar, 450 m, por los 363 m de B1, con lo cual las series de ozono deberían ser comparables, y muestra valores de estabilidad (calculados a partir del número de Richardson) acordes con la serie de ozono registrada en B1-A Mourela, que a su vez presenta un comportamiento nocturno similar al

de la estación G2-Vilanova y opuesto al de B2-Louseiras. Esto parece confirmar, junto con las alteraciones de intensidad de viento, que el fenómeno de persistencia nocturna en B2-Louseiras los días previos y posteriores a la jornada central está causado por alteraciones turbulentas de la capa estable nocturna, que facilitan la mezcla de ozono presente en estratos superiores y dificultan la destrucción del mismo.

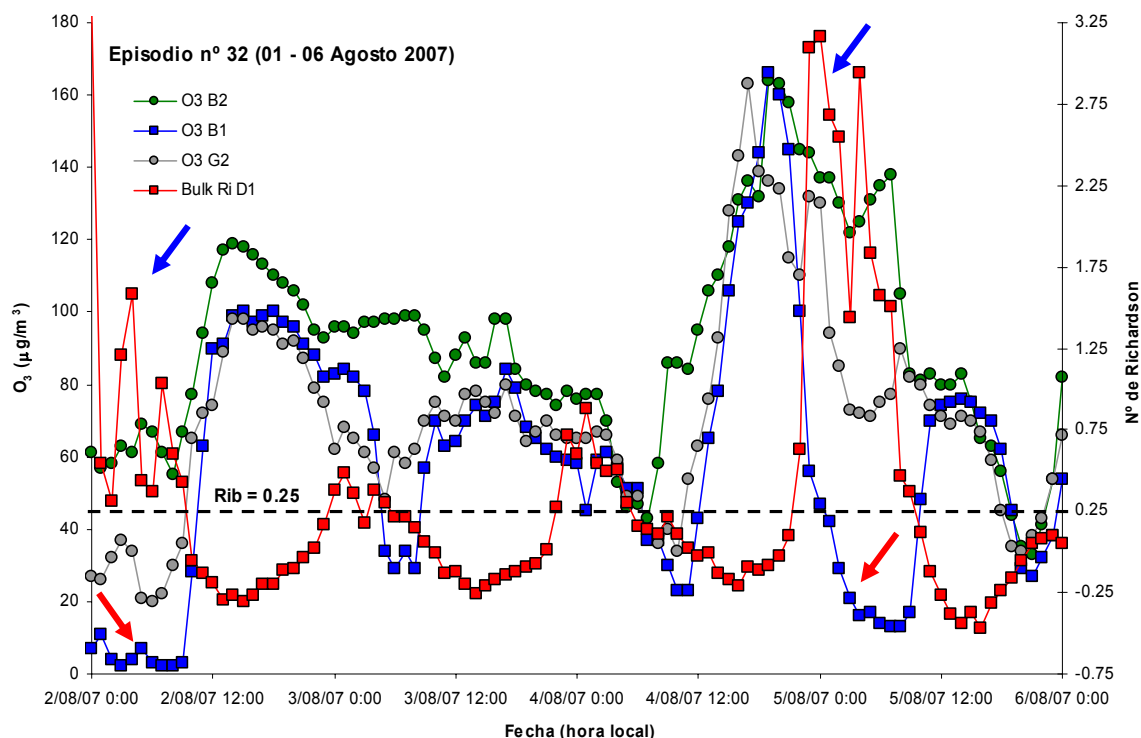


Figura 3.75: “Series temporales de concentración superficial de ozono en las estaciones B1-A Magdalena, B2-Louseiras y G2-Vilanova, frente al número de Richardson calculado en la estación D1-A Mourela, próxima a las estación B1, para los cuatro días centrales del episodio nº32 (01 - 06 Agosto de 2008). El número de Richardson (bulk Richardson number Rib) se calculó a partir de medidas a 10 m y 80 m, según la expresión  $Ri_b = (g/T_v) \cdot \Delta\theta_v \cdot \Delta z \cdot (\Delta u^2 + \Delta v^2)^{-1}$ , siendo  $g$  la aceleración de la gravedad,  $T_v$  la temperatura virtual absoluta,  $\Delta\theta_v$  la diferencia de temperatura potencial virtual a través de una capa de espesor  $\Delta z$ , y  $\Delta u$  y  $\Delta v$  los cambios en las componentes horizontales de viento a través de la misma capa”

Por otro lado es interesante destacar que la generación de ozono diurno es semejante en las dos estaciones consideradas, B2-Louseiras y G2-Vilanova, pues aunque existen diferencias en los máximos diurnos, mayores hasta el día 4 en B2, se deben a la mayor concentración nocturna de fondo existente en esta estación debido a la persistencia, siendo despreciables las discrepancias en la magnitud del ascenso diurno. De hecho, el día 4, con valores nocturnos similares en ambas estaciones, los máximos diurnos apenas difieren.

- c) El cambio en la dirección de viento, provocado por el cambio de régimen sinóptico, con flujo del E-NE a régimen local, con brisas marinas del O-NO en G2 - Vilanova y vientos de valle del SO en B2- Louseiras es otro factor que favorece la mezcla vertical de ozono, así como el arrastre de precursores emitidos en la costa coruñesa, más poblada e industrializada, que contribuye al incremento de los niveles diurnos de ozono troposférico. Posteriormente, el día 5 el viento se mantiene de componente Oeste debido al debilitamiento de las condiciones anticiclónicas y la influencia de un centro de bajas presiones situado al norte de las Islas Británicas.

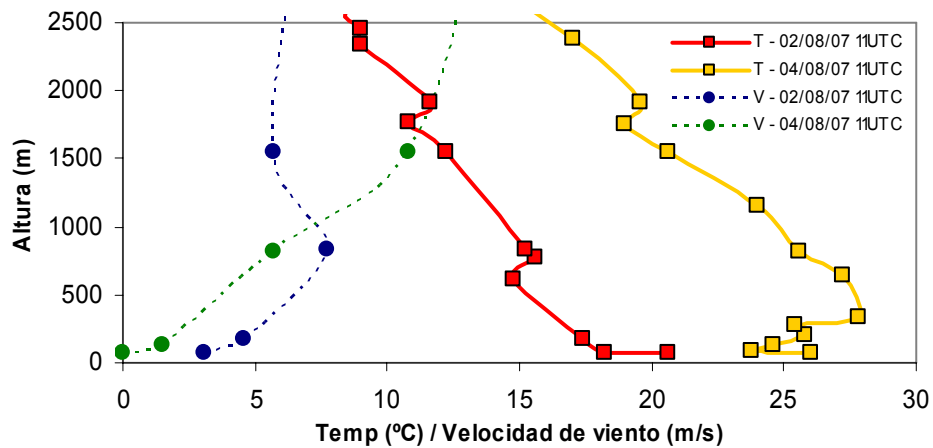


Figura 3.76: "Perfil vertical de temperatura (■) y velocidad de viento (●), obtenidos de los radiosondeos del C.M.T. de A Coruña los días 02/08/2007 y 04/08/2007 a las 13 LT (hora local)"

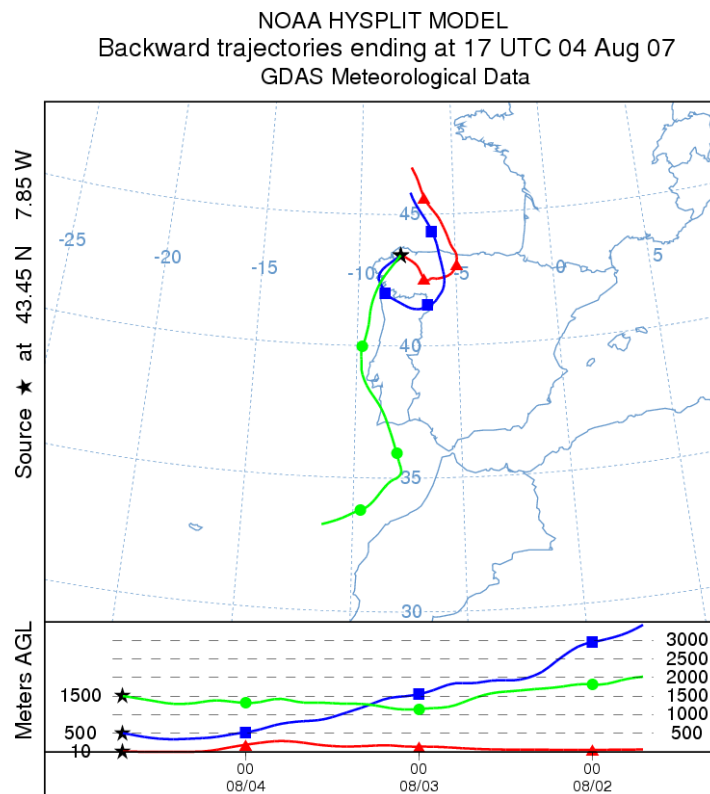


Figura 3.77: "Trayectorias con llegada en la estación B1-A Magdalena a las 17 UTC del día 04/08/07, y origen 72 horas antes. Los distintos colores indican las alturas de llegada establecidas (rojo a 10 m, azul a 500 m y verde a 1500 m)"

Los radiosondeos lanzados en la estación meteorológica que mantiene la Agencia Estatal de Meteorología en A Coruña muestran bajas intensidades de viento en altura, que sopla del Norte el día 2 y del Este el día 3, rolando al Sur la jornada del 4 de Agosto y recuperando la componente N-NE el día 5. Destaca la subsidencia provocada por la situación anticiclónica dominante, que provoca el desarrollo de inversiones térmicas, a mayor altura que las provocadas por enfriamiento nocturno superficial, como se observa en los radiosondeos lanzados a las 11 UTC de los días 2 y 4 (figura 3.76). Estas inversiones favorecen el confinamiento del ozono próximo a la superficie. Las simulaciones de trayectorias a 500 m con el modelo HYSPLIT (figura 3.77) también apuntan a fuertes inversiones térmicas que mantienen el ozono en una estrecha capa cercana a la superficie, además de mostrar un

escaso desplazamiento de las masas de aire durante los días previos a la jornada 4, en que se alcanza el valor máximo de inmisión, sosteniendo la hipótesis de formación autóctona del ozono. Se observa claramente que las trayectorias a 500 y 1500 m están desacopladas, mostrando direcciones diferentes, debido al débil forzamiento sinóptico que caracteriza al período central de este episodio.

Finalmente, las simulaciones de calidad del aire desarrolladas por el modelo EURAD también apuntan hacia la generación local de ozono como causa principal en este episodio, mostrando un aumento brusco y generalizado en la costa atlántica de la península Ibérica (figura 3.78).

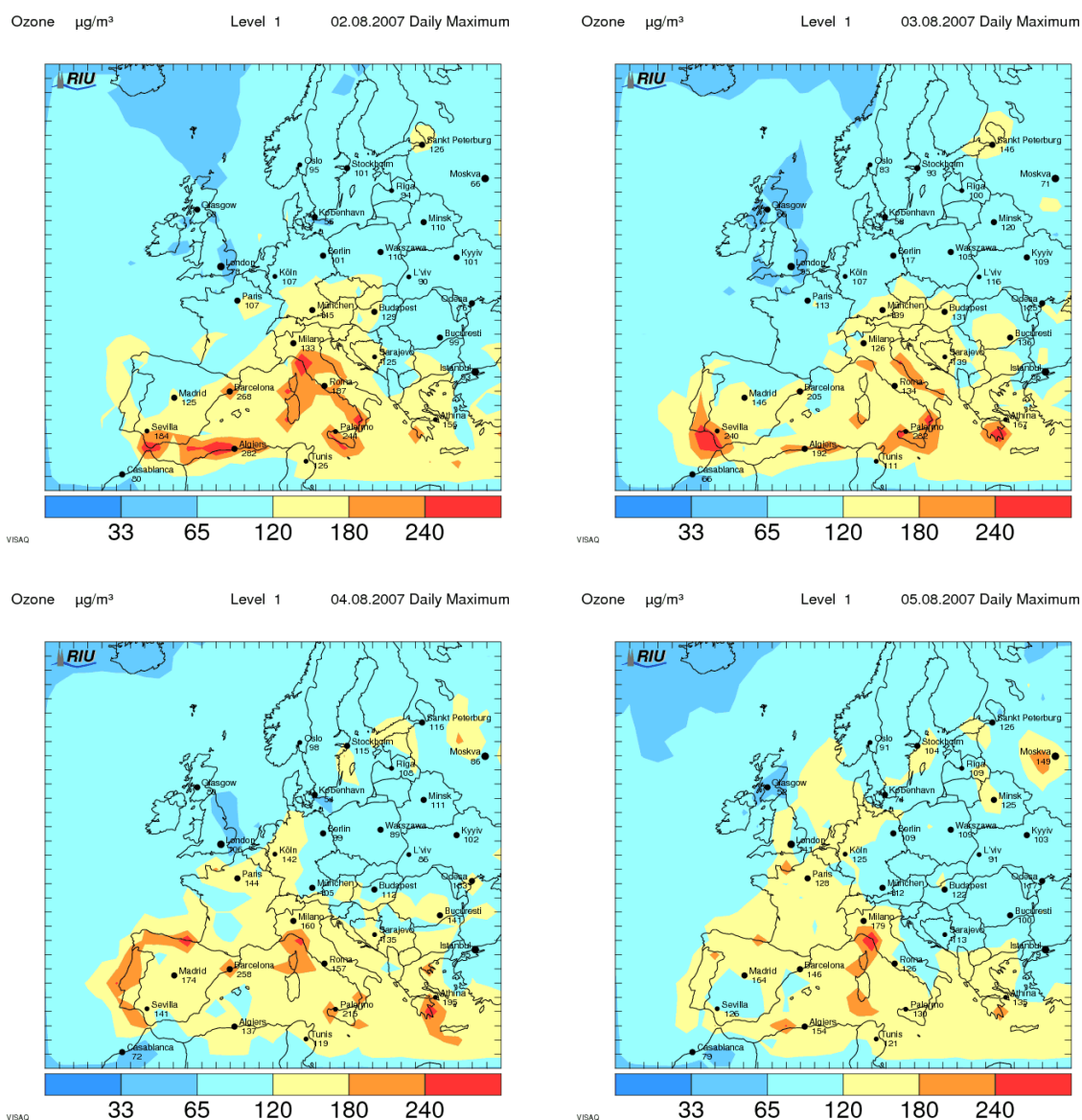


Figura 3.78: “Predicciones de calidad de aire (máximo horario de  $O_3$ ) sobre Europa occidental según el modelo EURAD para los días 02-05/08/2007. Fuente: Rhenish Institute for Environment Research, 2010”

Es interesante señalar que la escasa duración en los episodios caracterizados como “puntuales” no conlleva un menor riesgo de superación de los umbrales legales de ozono troposférico, pues aunque no se alcance el nivel de “información a la población” ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), las condiciones meteorológicas dominantes durante este tipo de episodios favorecen el mantenimiento de los niveles de ozono, lo cual facilita la superación del límite octohorario de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , como ocurre en este caso los días 4 y 5 de Agosto, así como en el resto de episodios de este tipo, salvo en el episodio nº 9, en el cual se partía de un valor máximo horario

realmente bajo ( $139 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En relación con esto, y según el criterio de clasificación de los episodios puntuales, en cada uno de ellos sólo se ha superado el valor de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una jornada (salvo en el episodio nº 9, que no ha alcanzado los  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y sólo en uno de ellos el valor de  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (episodio nº 1).

#### a2) Episodios progresivos

Un tipo de episodios con características diferentes son los episodios progresivos (figuras 3.79 y 3.80), que muestran al menos dos días consecutivos de ascenso de los niveles de ozono troposférico, constituyendo el grueso de los episodios analizados, en concreto el 75% restante. Este tipo de episodios constituyen un grupo mucho más heterogéneo que los episodios “puntuales”, y no se pueden establecer características comunes en las series de inmisión, dada su elevada variabilidad. Sin embargo, se ha realizado una clasificación en función de la intensidad del aumento de la inmisión de ozono:

- a) Episodios con incrementos suaves, inferiores al 25%, en los dos días previos al registro del máximo horario (episodios nº 4, 5, 6, 12, 13, 17, 18, 20, 26, 29 y 30)
- b) Episodios con incrementos medios, entre el 25 y el 50%, en al menos uno de los dos días previos a la jornada en que se alcanza la inmisión máxima horaria, pero sin llegar a aumentos superiores al 50% en ninguna de las jornadas (episodios nº 7, 11, 14, 16, 22, 23, 24, 25 y 31)
- c) Episodios con aumentos acusados, superiores al 50%, en al menos uno de los dos días previos a la jornada que registra la inmisión máxima horaria (episodios nº 2, 15, 21 y 27)

Debe destacarse que los episodios del último subgrupo, que presentan alguno de los dos días con aumentos intensos de los niveles de ozono, están más próximos a los episodios “puntuales” que a los “progresivos”, en el sentido de que la contribución local debe tener gran importancia en algún momento para elevar bruscamente la inmisión de ozono en un período máximo de 24 horas. Sin embargo, se han clasificado como episodios “progresivos” debido al crecimiento continuo de los valores de ozono, aunque sus características son similares a los episodios “puntuales”, con una mayor reducción de la inmisión de ozono durante la noche previa y posterior al registro del máximo episódico. Del mismo modo, la meteorología en estos períodos es comparable a la observada en los episodios de carácter puntual, con máximas diurnas por encima de  $30^\circ\text{C}$  y acusados ascensos térmicos, entre  $5^\circ\text{C}$  y  $10^\circ\text{C}$ , de una jornada a la siguiente, así como vientos flojos de componente E-SE y brisas locales de componente Oeste. También en estos episodios, como en los que presentan aumento puntual, los máximos registros de ozono se alcanzan preferentemente en las estaciones más interiores, como C9-Mourence en este caso (en tres de los cuatro episodios), a la que se añade B1-A Magdalena en los de carácter puntual: en el 75% de los mismos, el máximo se alcanza en una de estas dos estaciones, cuando en términos generales, ambas suponen menos del 47% de los máximos episódicos.

El resto de los episodios considerados típicamente como “progresivos” (aumentos de hasta el 50% en alguno de los dos días previos) constituyen el 62.5% del total, y no muestran diferencias apreciables en función de su grado de incremento de los niveles de ozono, pero sí un comportamiento diferente durante los tramos nocturnos con respecto a los episodios puntuales, careciendo del descenso lineal típico de la mayoría de éstos: tomando como referencia la estación F2-Fraga Redonda, sólo el 5% de este tipo de episodios progresivos, el episodio nº 25, alcanza niveles de ozono inferiores al 40% del valor máximo de inmisión durante la noche previa, y es habitual la aparición de aumentos nocturnos de ozono, así como un notable mantenimiento de los mismos (figura 3.80). Incluso se observan diferencias significativas en la persistencia nocturna entre los episodios con aumentos suaves y medios, presentando estos últimos un mayor grado de persistencia nocturna, con significación superior al 5% según el estadístico de Mann-Whitney para la misma estación F2-Fraga Redonda.

Estos episodios progresivos parecen responder a un mecanismo más complejo, basado en el transporte vertical y/o advectivo, con importantes contribuciones de ozono procedentes de áreas distantes (litoral cantábrico peninsular, meseta castellana, costas portuguesas e incluso



Centroeuropa), y sin descartar la propia contribución local de ozono y precursores. Esta complejidad en cuanto a su origen se pone de manifiesto en la mayor constancia de los registros de ozono, incluidos los periodos nocturnos, lo cual sugiere un aporte continuo de ozono desde zonas limítrofes o alejadas.

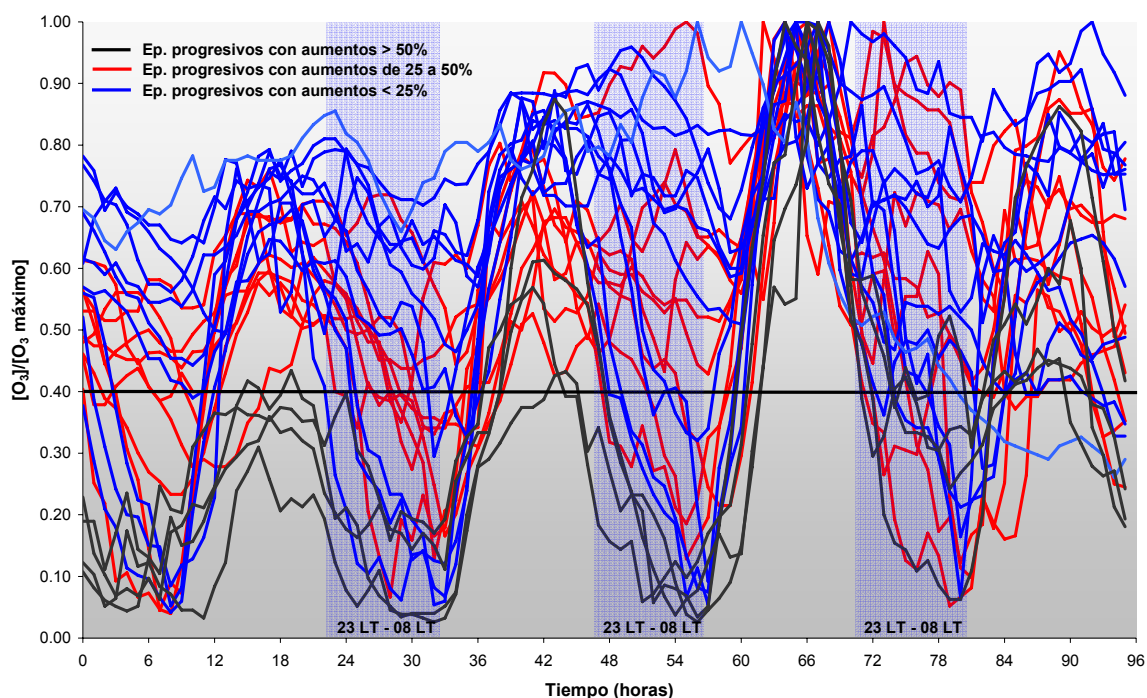


Figura 3.79: “Series temporales de concentración superficial de ozono relativa a la concentración máxima registrada en el episodio, representadas para los episodios de carácter progresivo en la estación de medida que alcanza dicha concentración máxima, indicada en la leyenda. Se representa la jornada que registra el máximo valor de ozono troposférico, las dos jornadas previas y la jornada posterior”

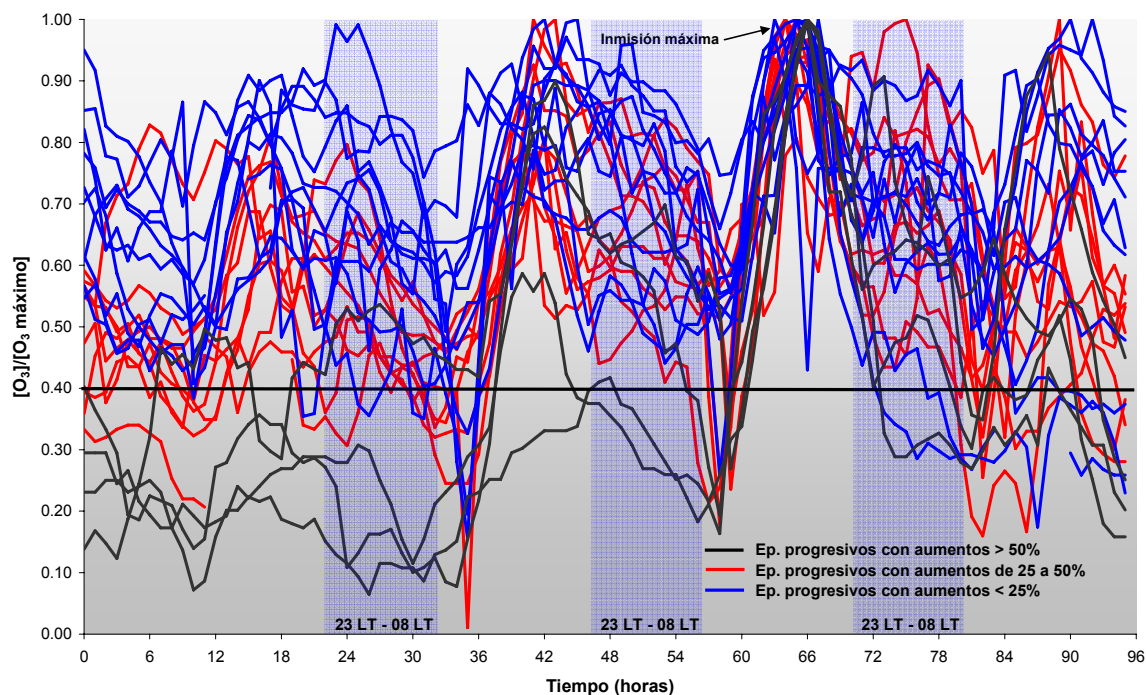


Figura 3.80: “Series temporales de concentración superficial de ozono relativa a la concentración máxima registrada en el episodio, representadas para los episodios de carácter progresivo en la estación F2-Fraga Redonda. Se representa la jornada que registra el máximo valor de ozono troposférico, las dos jornadas previas y la jornada posterior”

Los diferentes tipos de episodios progresivos se desarrollan bajo todas las posibles situaciones sinópticas recogidas, sin presentar una configuración preferencial, del mismo modo que los trayectorias no muestran características comunes, apareciendo episodios progresivos bajo todos los orígenes considerados. Esta situación responde a la existencia de distintas áreas fuente de ozono, que posteriormente es transportado hacia el noroeste peninsular bajo distintas situaciones sinópticas.

En cuanto a la meteorología local de los episodios progresivos, debe destacarse que las temperaturas máximas son ligeramente inferiores a las registradas en los episodios puntuales, en general por debajo de los 28 °C (medidos en la estación D1-A Mourela). Del mismo modo, los incrementos térmicos son notablemente inferiores a los observados durante los episodios de carácter puntual, siempre por debajo de los 5 °C, y en muchos de ellos con mantenimiento de las temperaturas máximas (episodio nº 6, nº 11, nº 20, nº 23, nº 25, nº 29, etc.) o incluso pequeños descensos de las mismas en la jornada que registra el máximo episódico de ozono (episodio nº 7, nº 13, nº 17 y nº 24). Las excepciones en términos de temperatura las constituyen aquellos episodios que presentan incrementos de ozono superiores al 50%, siempre con máximas en torno a los 30 °C y con aumentos superiores a los 5 °C para el día que marca el mayor nivel horario de ozono, como se ha indicado previamente.

La dirección principal de viento durante los episodios progresivos es, al igual que en los episodios puntuales, E-SE, y de nuevo con formación de brisas marinas de componente Oeste en gran número de episodios. Esta coincidencia de la dirección de viento en la práctica totalidad de los episodios responde al hecho de que la componente Este es la que caracteriza al tiempo anticiclónico en el noroeste peninsular, causando días despejados con altas temperaturas y ausencia de precipitaciones frontales. Dentro de los episodios progresivos, los que muestran incrementos más intensos de la inmisión de ozono troposférico muestran una mayor influencia de la componente Sur que el resto de episodios, apuntando posiblemente a una fuente de transporte situada más al sur, como el centro o el litoral portugués.

No se han observado diferencias apreciables entre los episodios progresivos con aumentos suaves y medios de ozono en lo que se refiere a la meteorología local.

A continuación se presenta el análisis de dos episodios de carácter progresivo, el episodio nº 20, del 9 al 15 de Julio de 2005, considerado de carácter progresivo con incrementos suaves, y el episodio nº 24, del 3 al 10 de Junio de 2006, progresivo con aumentos diarios de ozono más acusados.

El episodio nº 20 (9-15 de Julio de 2005) constituye un ejemplo de los episodios progresivos con aumento suave de los niveles de ozono, según se observa en la figura 3.81, que muestra el incremento continuo de los niveles de inmisión de ozono en seis estaciones del noroeste peninsular; todas ellas presentan un comportamiento similar, con registros máximos comparables y persistencia nocturna de los valores de ozono, salvo la estación EMEP de O Saviñao, en el sur de Lugo, con un marcado descenso nocturno de la concentración de ozono, y la estación portuguesa de Lamas de Olo, con sorprendentes niveles de inmisión que doblan los registros alcanzados en el resto de las estaciones.

Un análisis más detallado realizado en la estación portuguesa de Lamas de Olo, situada en el distrito de Vila-Real, con una cota de 1086 m, indica la presencia de altos niveles de ozono en capas altas de la atmósfera, procedentes de la costa norte de Portugal, debido al régimen de brisas dominante, y con posibles aportes de la submeseta norte castellana (área urbana de Madrid). Esta conclusión se deriva de la presencia de picos de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, que aparecen simultáneamente con los de ozono (figura 3.82), y de la información obtenida a partir de la simulación de trayectorias de masas de aire (figura 3.83). La hipótesis planteada sugiere que el importante desarrollo de la capa de mezcla durante las tardes de este episodio, junto con la gran altitud de esta estación, facilita el transporte vertical del ozono situado en los estratos superiores, que alcanza la superficie terrestre provocando los altísimos registros de inmisión. Se observan incrementos de más de 150 µg/m<sup>3</sup> en una hora en esta estación de Lamas de Olo, lo cual parece deberse al transporte advectivo horizontal desde la costa y al transporte advectivo vertical del contaminante, al desarrollarse la capa de mezcla. Por otro lado, el hecho

de que los picos de  $\text{NO}_2$  sean simultáneos a los de  $\text{O}_3$  indica que se trata de ozono envejecido, transportado junto al  $\text{NO}_2$  en equilibrio con el propio ozono.

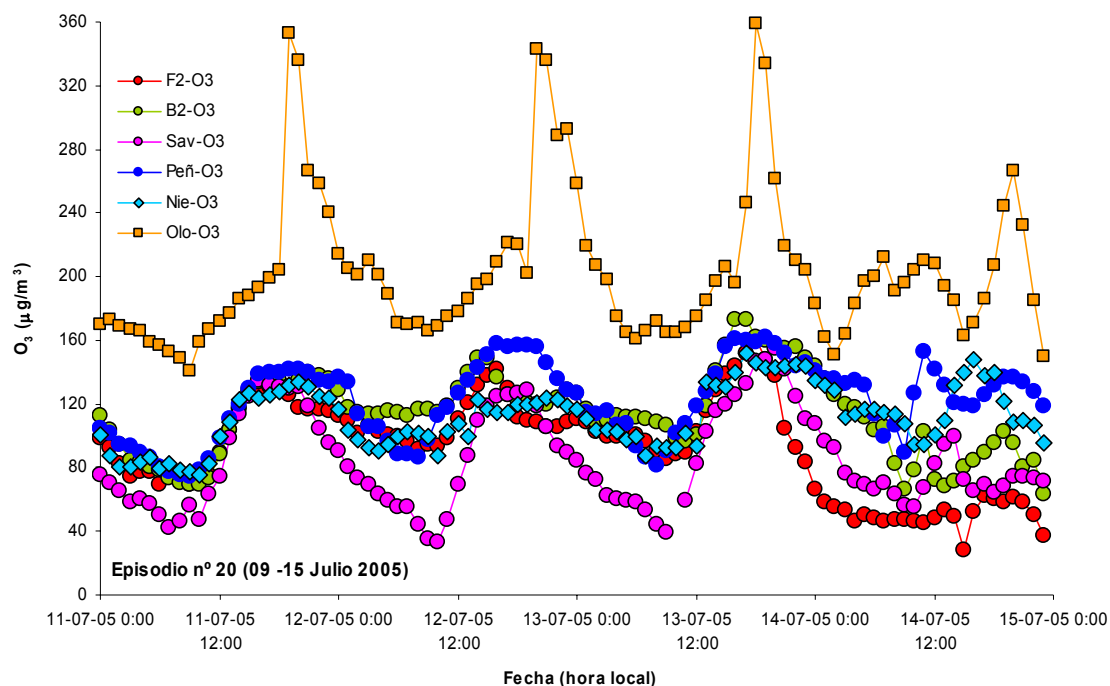


Figura 3.81: “Series temporales de concentración superficial de ozono en las estaciones B2-Louseiras, F2-Fraga Redonda, O Saviñao, Peñausende, Niembro y Lamas de Olo para los cuatro días centrales del episodio nº 20 (09 - 15 Julio 2005)”

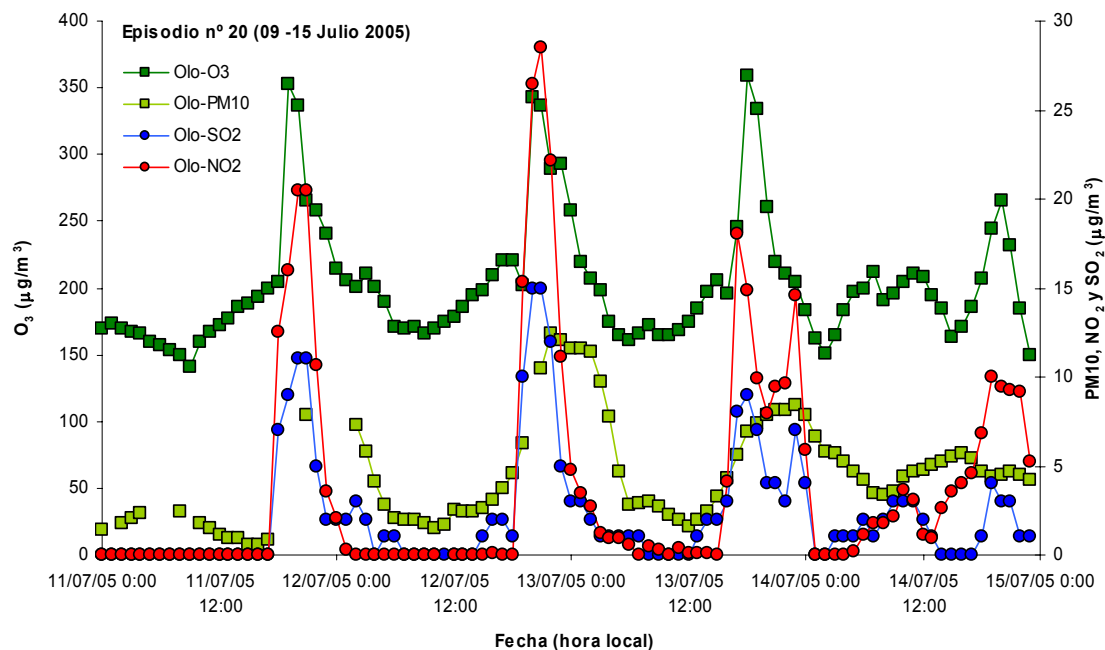


Figura 3.82: “Series temporales de concentración superficial de ozono, dióxido de nitrógeno, partículas  $\text{PM}_{10}$  y dióxido de azufre en la estación EMEP portuguesa de Lamas de Olo para los cuatro días centrales del episodio nº 20 (09-15 Julio 2005) en hora local española”



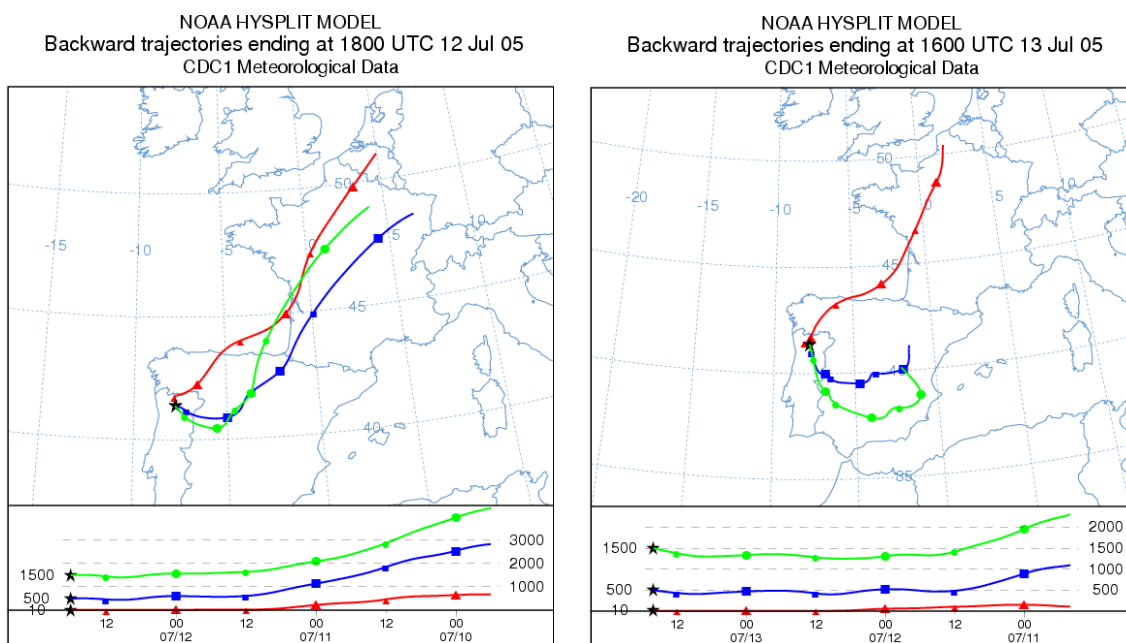


Figura 3.83: “Trayectorias con llegada en la estación Lamas de Olo a las 18 UTC del día 12/07/05 y a las 16 UTC del día 13/07/05, con origen 72 horas antes. Los distintos colores indican las alturas de llegada establecidas (rojo a 10 m, azul a 500 m y verde a 1500 m)”

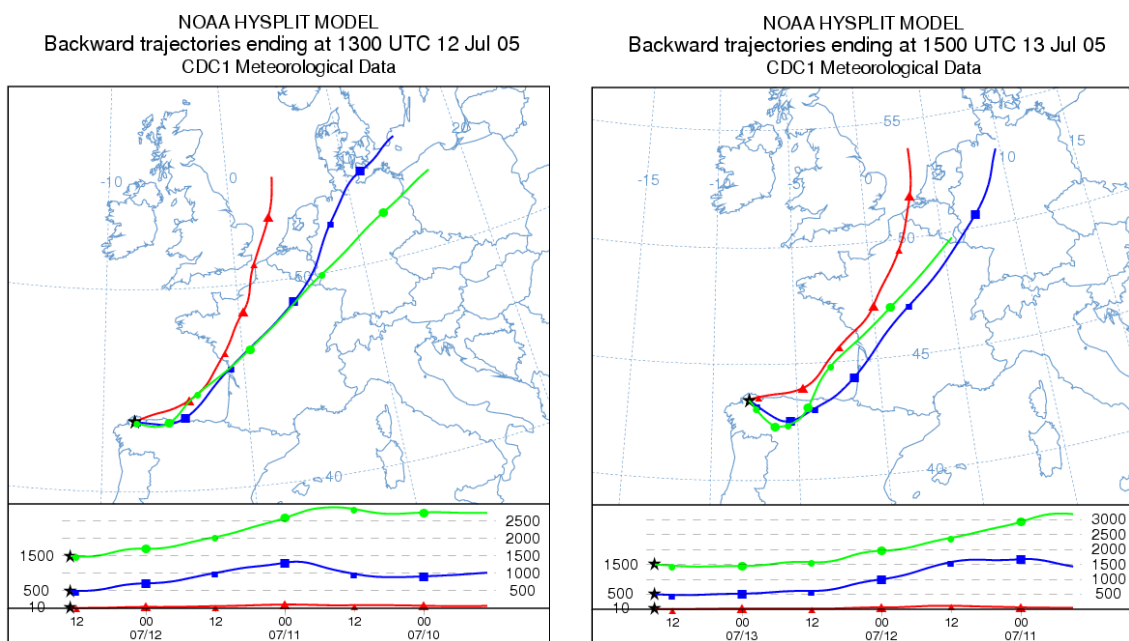


Figura 3.84: “Trayectorias con llegada en la estación B2-Louseiras a las 13 UTC del día 12/07/05 y a las 15 UTC del día 13/07/05, con origen 72 horas antes. Los distintos colores indican las alturas de llegada establecidas (rojo a 10 m, azul a 500 m y verde a 1500 m)”

Por tanto, esto sugiere la existencia de importantes concentraciones de ozono troposférico en la zona norte de Portugal, próxima a Galicia, debido al establecimiento del régimen de brisas marinas que soplan hacia el interior desde el oeste.

En la Comunidad Gallega la situación es diferente, con masas de aire procedentes del norte peninsular (figura 3.84), y niveles de ozono mucho menores. Según las trayectorias simuladas,

parte del ozono troposférico registrado en el noroeste peninsular procedería de la costa atlántica europea (Países Bajos, oeste de Alemania y Francia, etc) y del norte de la meseta castellana (área industrial de Ponferrada y León, con varias centrales térmicas de carbón). Aún así, no se observan en las estaciones gallegas concentraciones anómalas de otros contaminantes asociadas a los picos de ozono, como  $\text{SO}_2$  o partículas, que podrían haber servido como trazadores, probablemente debido al menor desarrollo de la capa límite, junto con la menor altitud de las estaciones de medida. Sin embargo, el limitado descenso de los valores nocturnos de inmisión apoya esta teoría del transporte advectivo desde el norte de la meseta y la costa cantábrica, sin descartar la correspondiente formación autóctona de ozono, debido a la importante radiación solar y a las altas temperaturas registradas durante esos días. A pesar de ello, la influencia de las centrales térmicas situadas en Galicia no se considera relevante durante este episodio para las estaciones seleccionadas: debido a la ausencia de brisas marinas, se mantiene la dirección E-NE dominante del viento local, con lo cual la única estación afectada sería F2-Fraga Redonda, que no muestra diferencias con el resto en la evolución de la inmisión de ozono ni de otros contaminantes que podrían utilizarse como trazadores ( $\text{SO}_2$  y partículas).

La configuración sinóptica es una de las más clásicas durante los episodios de ozono troposférico en el norte peninsular, con un intenso anticiclón de bloqueo situado sobre las islas Británicas a partir del día 11 (figura 3.85), que deriva en una vaguada ibero-africana, con flujo del E-SE sobre el noroeste de la península Ibérica y elevadas temperaturas incrementándose lentamente durante varias jornadas sucesivas, como se puede observar en la figura 3.86, que también muestra el dominio del viento sinóptico frente a los efectos locales, con dirección sostenida del NE-ENE en superficie y velocidades de viento superiores a muchos otros episodios identificados.

13JUL2005 00Z

### 500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

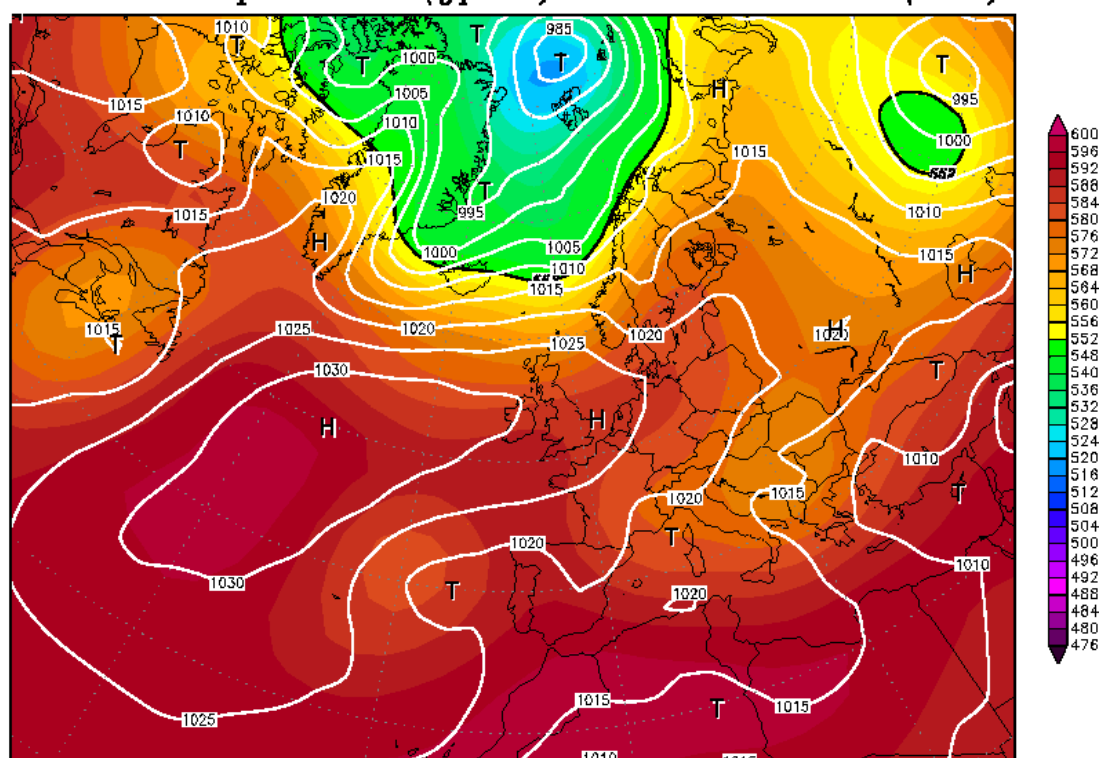


Figura 3.85: "Mapa sinóptico de superficie (hPa) y a 500 hPa (decámetros geopotenciales) para la jornada 13 de Julio de 2005, uno de los días centrales del episodio nº 20 (09-15 de Julio de 2005), mostrando una configuración de 'Vaguada ibero-africana', destacando el viento de componente Este sobre el noroeste peninsular y la dorsal africana en altura que provoca elevadas temperaturas. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)"

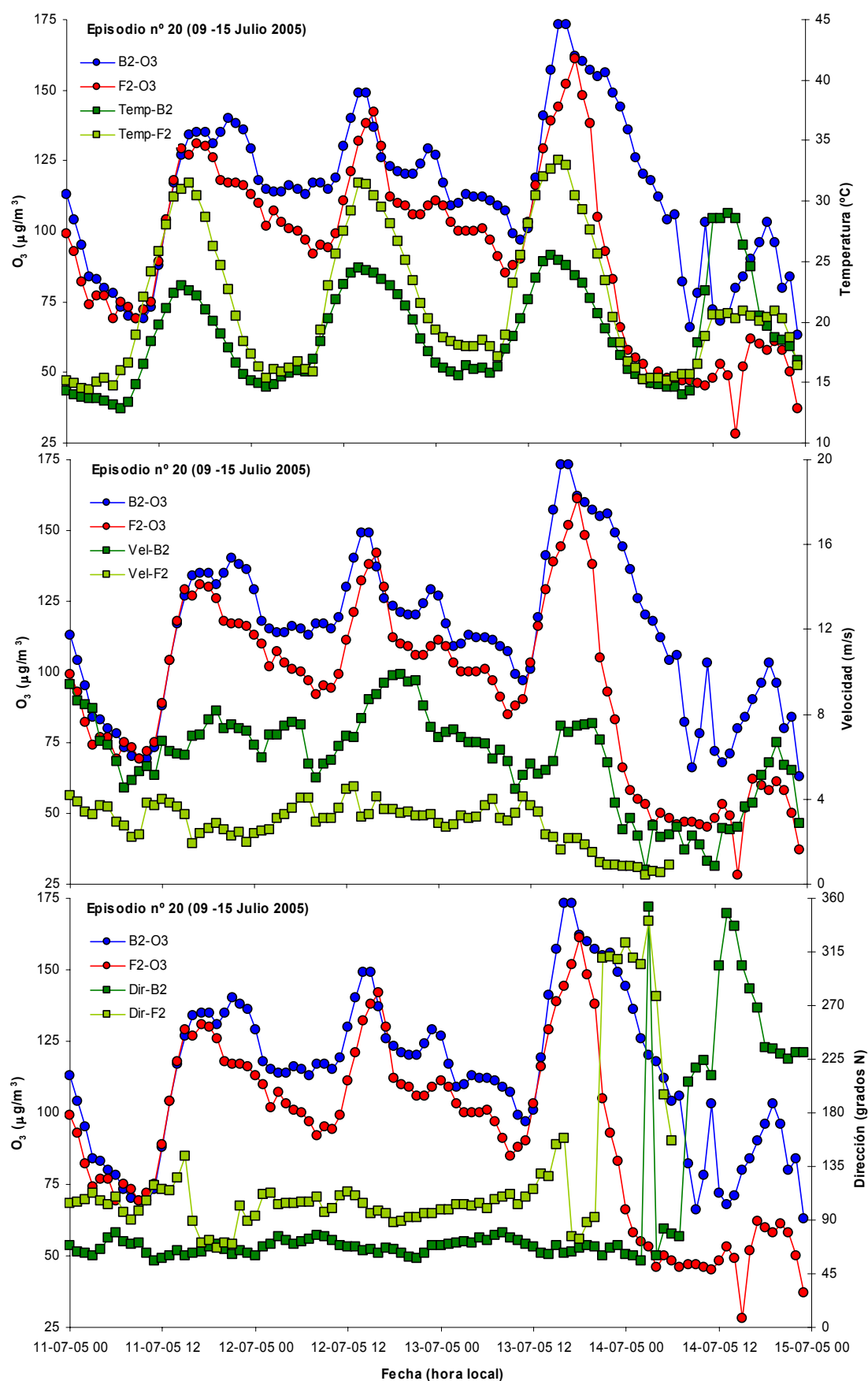


Figura 3.86: “Series temporales de concentración superficial de ozono frente a temperatura (arriba), velocidad de viento (medio) y dirección de viento (abajo) en las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda para los cuatro días centrales del episodio n° 20 (09-15 Julio 2005)”

En conclusión, se trata de un episodio de carácter progresivo, que se desarrolla a lo largo de varios días, afectando a todo el norte y noroeste peninsular, con registros muy similares de ozono en un área extensa, como muestran las estaciones situadas en Asturias, Galicia o Zamora. La principal causa de los niveles de ozono alcanzados parece encontrarse en el transporte advectivo de ozono envejecido desde el litoral atlántico de Europa (Alemania, Holanda, Francia, etc.), con una contribución peninsular centrada en el norte de la meseta castellana para las estaciones situadas en el norte de Galicia.

El episodio nº 24 (03-10 de Junio de 2006) es otro representante del grupo de episodios progresivos, aunque en este caso encuadrado dentro de aquellos episodios que presentan un aumento más significativo de la concentración superficial de ozono de una jornada a la siguiente, como se observa en la figura 3.87. Las estaciones gallegas muestran un aumento continuo de la inmisión de ozono, más acentuado el día 7. Salvo la estación asturiana de Niembro, el resto de estaciones rurales (Lamas de Olo y Peñausende) muestran la misma tendencia, lo cual supone un primer indicio para descartar el origen cantábrico del ozono troposférico. Son llamativos los niveles tan inferiores de ozono troposférico registrados en la estación de Peñausende, sobre todo con respecto a la estación de Lamas de Olo, en Vila-Real (noreste de Portugal).

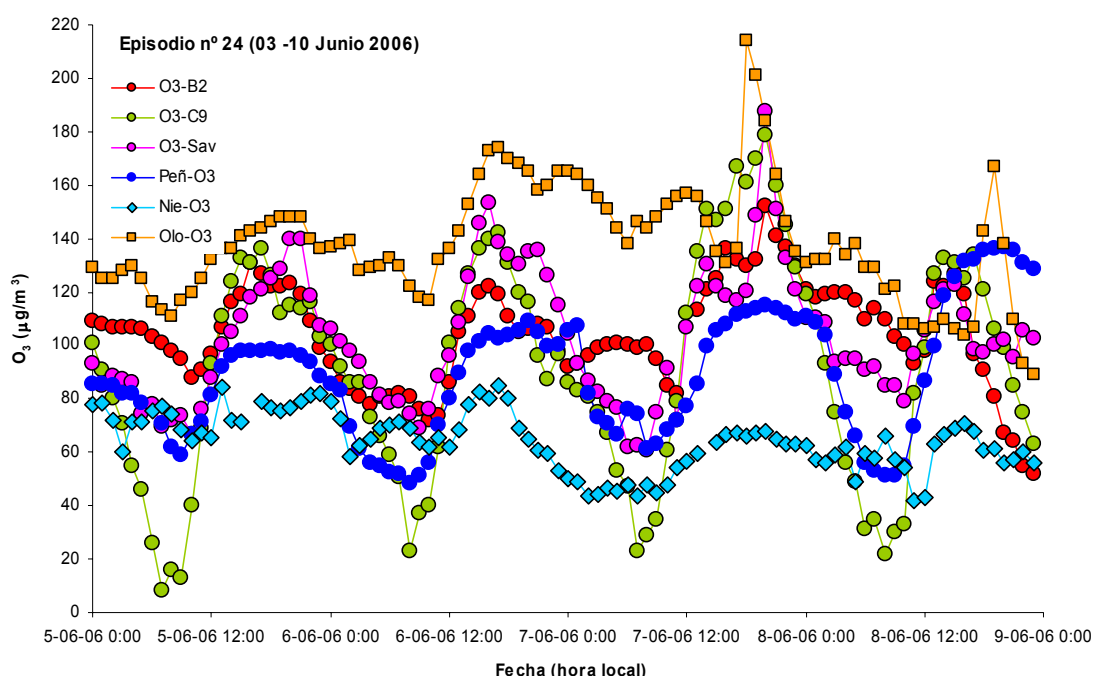


Figura 3.87: "Series temporales de concentración superficial de ozono en las estaciones B2-Louseiras, C9-Mourence, O Saviñao, Peñausende, Niembro y Lamas de Olo para los cuatro días centrales del episodio nº 24 (03 - 10 Junio 2006)"

La estación C9-Mourence muestra el perfil típico de formación local de ozono en una estación afectada por emisiones locales de  $\text{NO}_2$ , con aumentos de este contaminante a primera hora de la mañana (8-10 LT), y posterior descenso a medida que se establece la capa de mezcla y se forma el ozono troposférico por acción de la radiación fotoquímica local, para finalizar la jornada con un nuevo ascenso de  $\text{NO}_2$  a primera hora de la noche (21-00 LT), debido a nuevas emisiones de óxidos de nitrógeno, a la falta de radiación solar que provoque su transformación en ozono y al inicio del desarrollo de la capa estable nocturna (figura 3.88, arriba). El perfil de ozono y dióxido de nitrógeno para la estación de O Saviñao es muy similar, mostrando también una importante contribución de formación local, aunque los niveles de  $\text{NO}_2$  son menores y con máximos más retrasados en el tiempo, características debidas a su menor influencia urbana e industrial. Sin embargo, la tarde del día 7 se producen algunas diferencias en ambas estaciones con respecto al régimen anterior, con un aumento mayor de los niveles de  $\text{NO}_2$  en ambas a partir de las 18 horas de la tarde, asociado a un incremento simultáneo de ozono

troposférico, alcanzándose el máximo a las 20 LT. Esta elevación de los niveles de  $\text{NO}_2$  coincide en ambas estaciones con mayores niveles de  $\text{SO}_2$  (figura 3.88, abajo), muy significativos en la estación C9-Mourence, en la que el  $\text{SO}_2$  alcanza valores de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual podría ser indicativo del transporte de contaminantes desde otras áreas próximas.

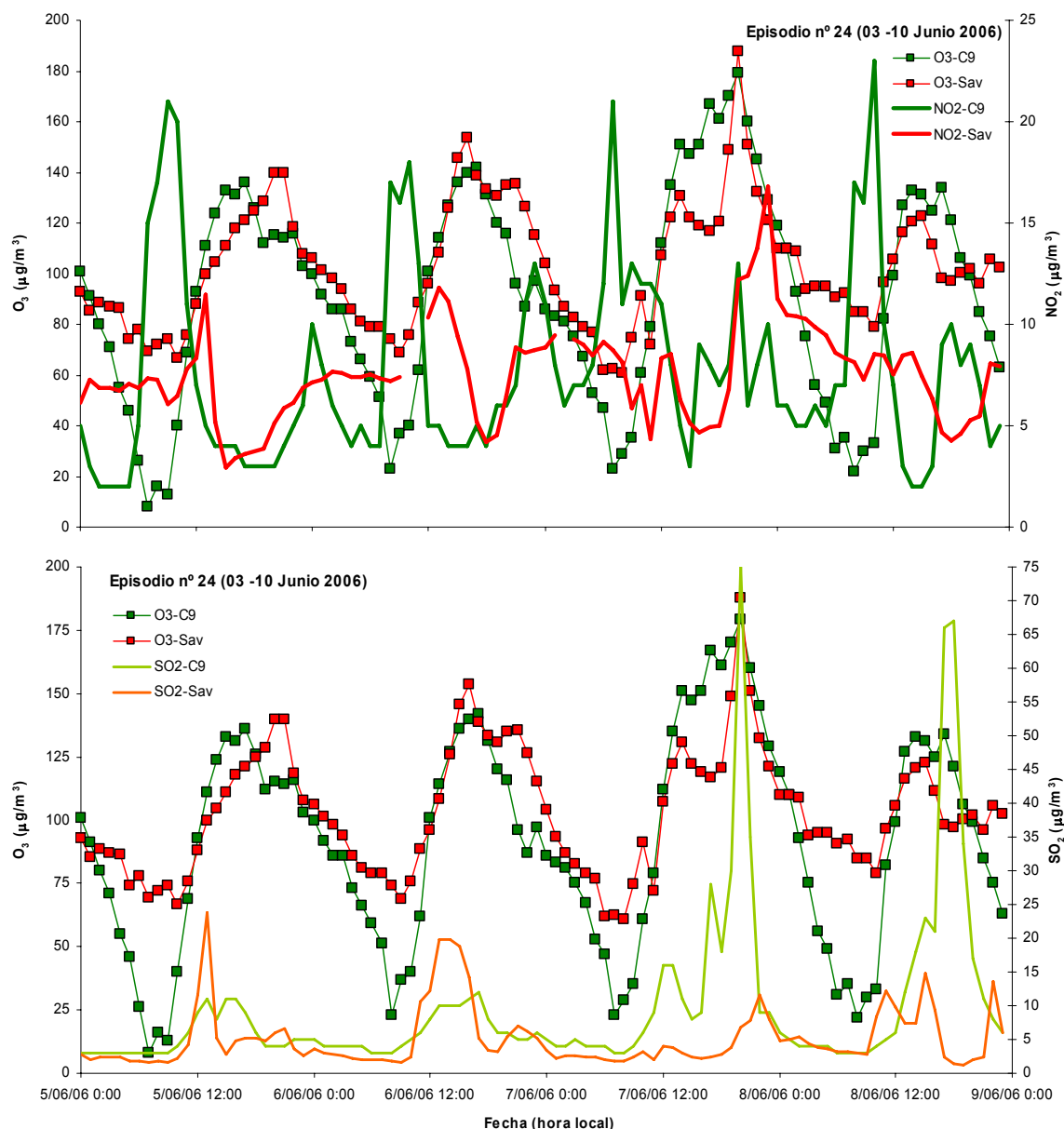


Figura 3.88: "Series temporales de concentración superficial de ozono frente a  $\text{NO}_2$  (arriba) y  $\text{SO}_2$  (abajo) en las estaciones C9-Mourence y O Saviñao para los cuatro días centrales del episodio nº 24 (03-10 Junio 2006)"

La serie temporal de contaminantes en la estación B2-Louseiras (figura 3.89) también refleja la formación fotoquímica de ozono a partir del  $\text{NO}_2$  presente en el área, pero alcanzando valores notablemente inferiores de ozono troposférico durante el día; sin embargo, durante la noche la concentración de ozono se mantiene en niveles superiores a los del resto de estaciones, favorecida por la limitada concentración de  $\text{NO}_x$ , que reduce su eliminación; por el contrario, los niveles nocturnos de  $\text{SO}_2$  son más elevados en la estación B2-Louseiras durante la noche que en el resto de estaciones. Aún así, no se aprecian indicios claros de transporte alóctono que justifiquen los altos valores de ozono durante los períodos nocturnos en esta estación.



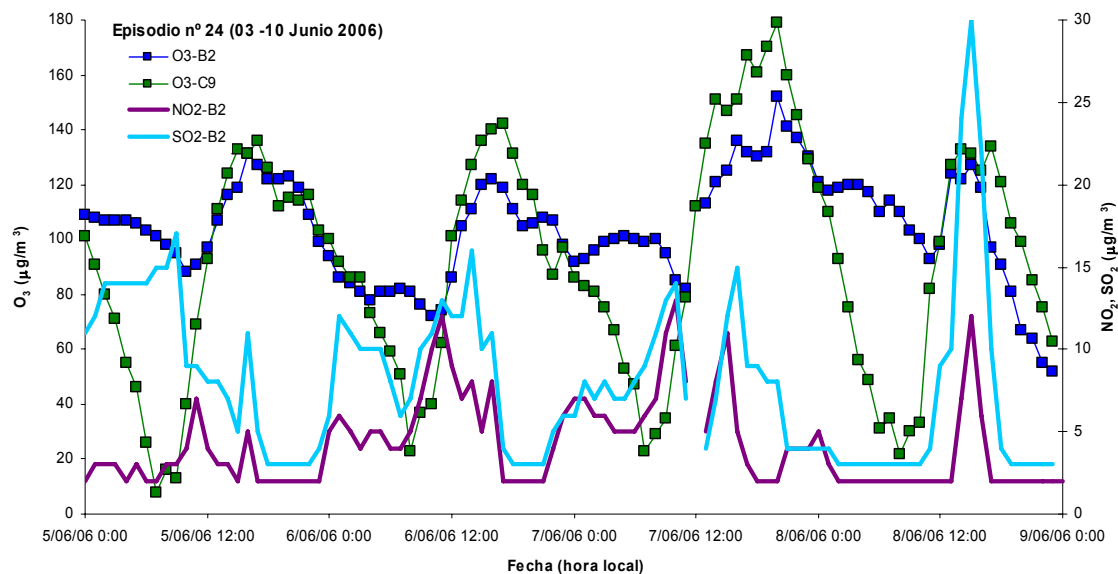


Figura 3.89: "Series temporales de concentración superficial de ozono frente a  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$  en la estación B2-Louseiras para los cuatro días centrales del episodio nº 24 (03-10 Junio 2006)"

07JUN2006 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

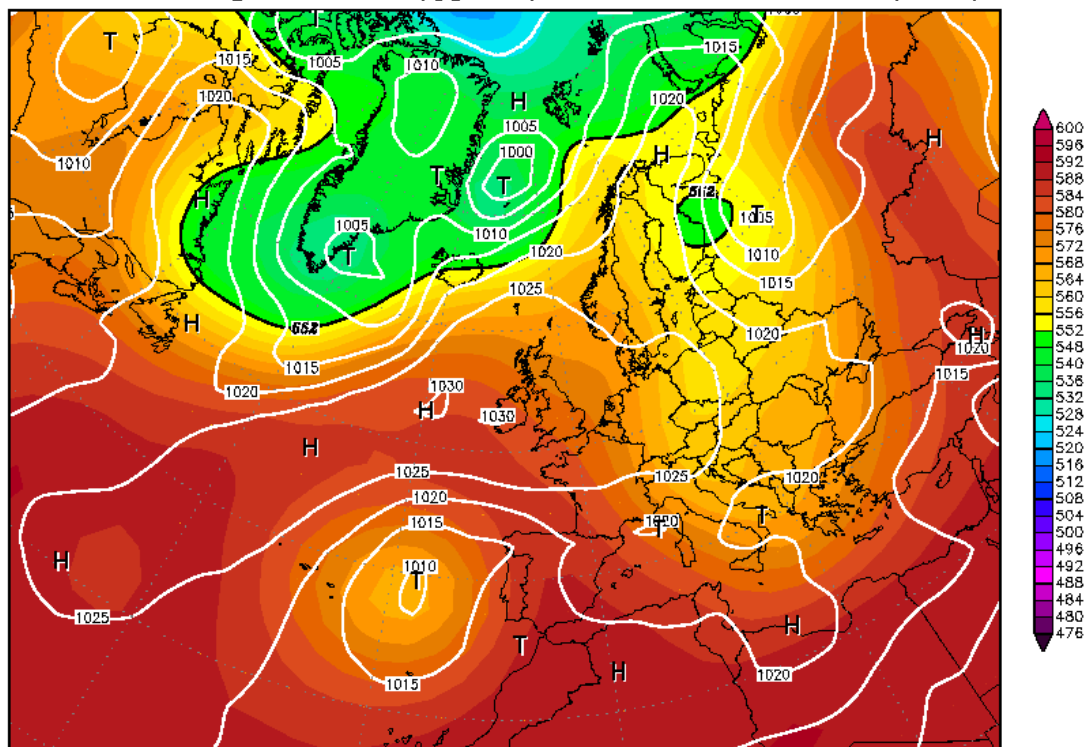


Figura 3.90: "Mapa sinóptico de superficie (hPa) y a 500 hPa (décadas geopotenciales) para la jornada del 7 de Junio de 2006, correspondiente a uno de los días centrales del episodio nº 24 (03-10 de Junio de 2006), mostrando una configuración de 'Altas presiones sobre el Atlántico y Europa', con viento de componente Este-Sureste sobre el noroeste peninsular, que tiende a rolar a componente Sur debido al centro de bajas presiones situado al oeste de Portugal. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)"

Las series meteorológicas reflejan la situación sinóptica dominante durante este episodio, con un potente anticiclón de bloqueo situado sobre las Islas Británicas y un débil centro de bajas presiones acercándose a la península Ibérica desde las Azores, hasta situarse al oeste de

Lisboa (figura 3.90). Esta configuración es la causante de las altas temperaturas en Galicia, con temperaturas máximas superiores a 30 °C en el interior e inferiores en la costa, sobre 25 °C, y de los vientos de componente Este, que rolan al S-SO a medida que se acerca la citada borrasca a la costa atlántica. El régimen de vientos es claramente local en estaciones como O Saviñao, en la que dominan los vientos de valle - montaña, con establecimiento de vientos descendentes del NO durante la noche y ascendentes del SE durante el día, mientras en otras estaciones como B2-Louseiras, el viento refleja la dirección sinóptica, manteniendo la dirección Este hasta que se hace notar el efecto del centro de bajas presiones, rolando a dirección S-SO.

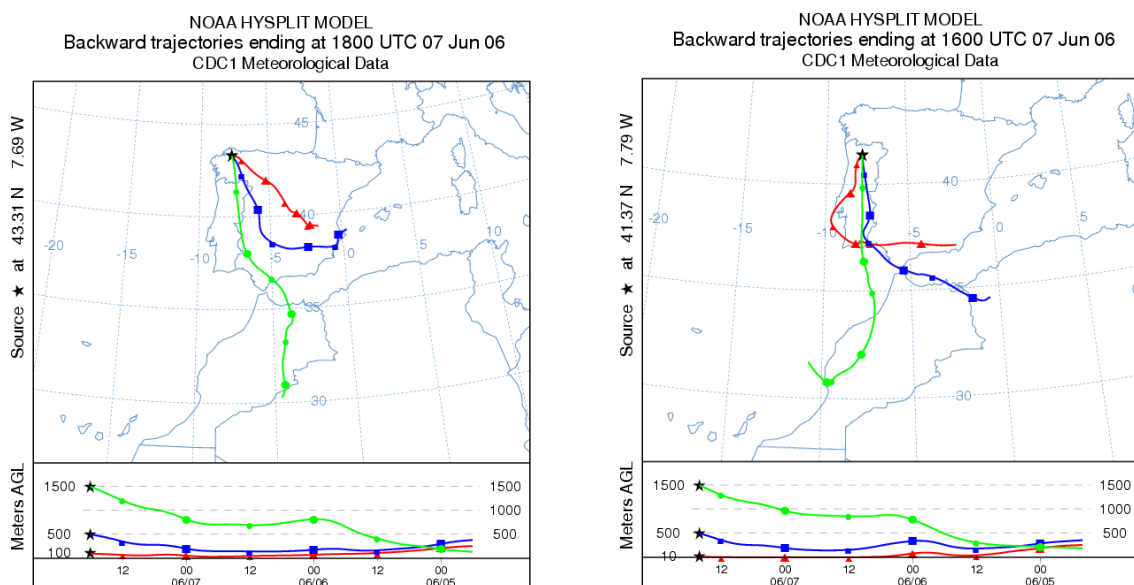


Figura 3.91: “Trayectorias con llegada en las estaciones C9-Mourence y Lamas de Olo a las 18 UTC y 16 UTC del día 07/06/06, respectivamente, y origen 72 horas antes. Los distintos colores indican las alturas de llegada establecidas (rojo a 100 m, azul a 500 m y verde a 1500 m)”

El análisis comparado de las series meteorológicas y de inmisión apuntan a un doble origen del ozono en las estaciones gallegas: por una parte, la formación fotoquímica local es patente en todas las estaciones analizadas, observándose claramente el ciclo opuesto  $\text{NO}_2$ - $\text{O}_3$ , mientras que, por otro lado, aparecen trazas de la existencia de notables niveles de contaminantes en masas de aire envejecidas en estaciones como O Saviñao, con niveles inexistentes de  $\text{NO}$  y valores apreciables de  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$  coincidiendo con los registros máximos de ozono. El área fuente de estos precursores de ozono y del propio ozono parece estar al sur de Galicia, sobre Portugal y el centro - sur peninsular, origen apoyado por las retrotrayectorias que finalizan en las estaciones gallegas y del norte de Portugal (figura 3.91), así como por el gradiente positivo de concentración de ozono en dirección sur-norte, obtenido a partir de las medidas de inmisión en estaciones rurales como Lamas de Olo, O Saviñao y B2-Louseiras (figura 3.87). El efecto del transporte parece más intenso en el sur de Galicia, mientras en el norte dominan los procesos de formación local, aunque los elevados niveles de fondo en estaciones como B2-Louseiras, con una importante inmisión nocturna, podrían achacarse en parte a este tipo de transporte alóctono. Sin embargo, la orografía que caracteriza el emplazamiento de esta estación, con varias sierras encadenadas, debe dificultar la llegada de masas de aire procedentes del sur, o al menos disminuir su efecto frente al registrado en otras estaciones, como C9-Mourence y O Saviñao, localizadas en entornos más llanos.

El origen de los precursores nitrogenados que favorecen la generación fotoquímica local de ozono en el noroeste peninsular es difícil de determinar, aunque en algunas estaciones (C9-Mourence) es claramente achacable al tráfico (alto contenido en  $\text{NO}$  y perfil horario característico de tráfico) y a fuentes industriales (altos niveles de partículas y  $\text{SO}_2$  con viento de componente NO durante el día, patrones típicos de procesos de combustión), como se observa en las figuras 3.88 y 3.92. En otras estaciones como B2-Louseiras, determinar el origen de los

precusores locales es más complicado, pues el efecto del tráfico es mucho menos apreciable, con niveles bajos de NO, aunque se mantienen niveles medios de SO<sub>2</sub>, probablemente procedentes de instalaciones industriales situadas en la costa cantábrica, al nordeste de la estación.

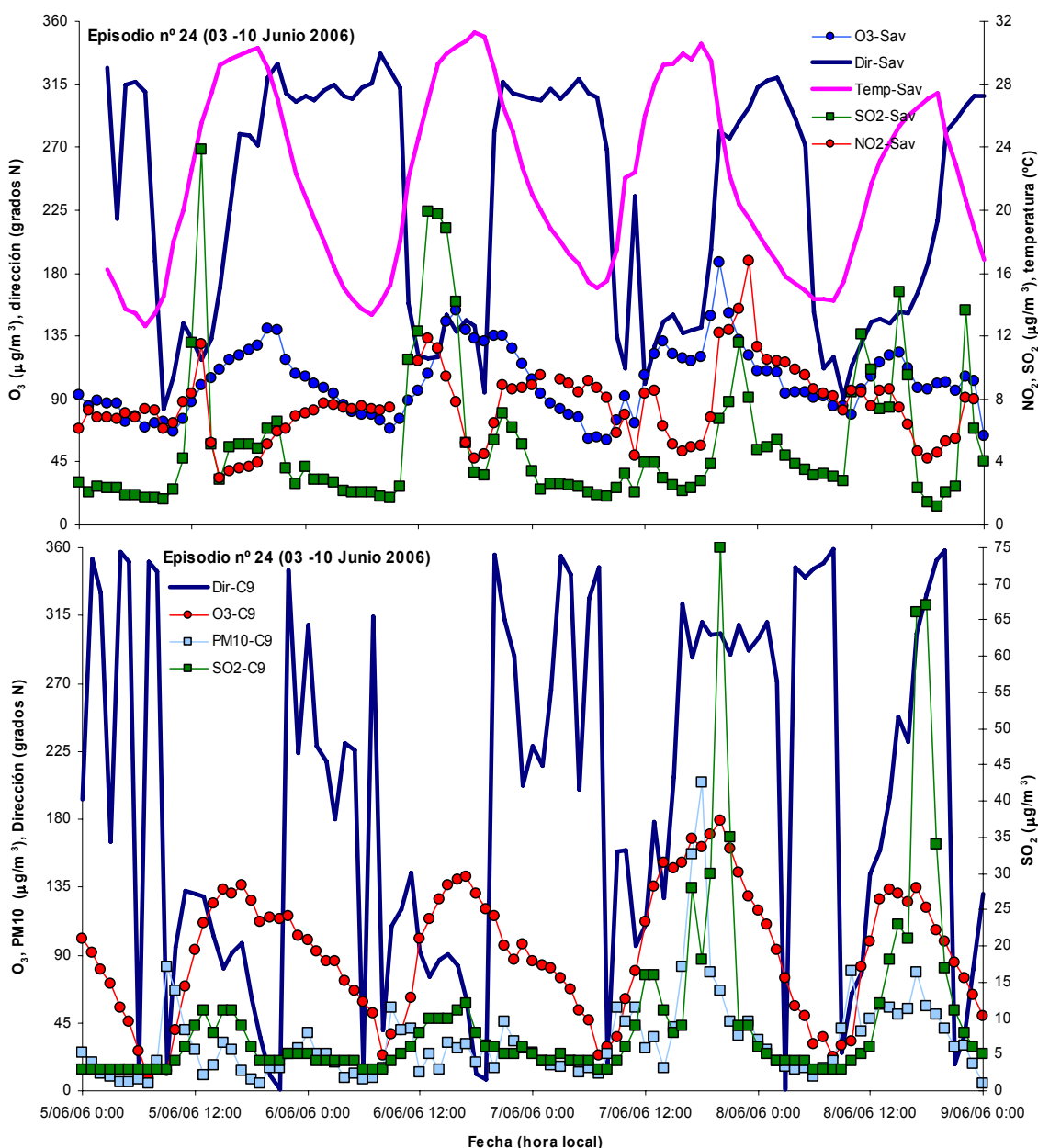


Figura 3.92: “Series temporales de concentración superficial de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> frente a la dirección de viento y a la temperatura en la estación de O Saviñao (arriba) y de O<sub>3</sub>, partículas PM10 y SO<sub>2</sub> frente a la dirección de viento en la estación C9-Mourence (abajo) para los cuatro días centrales del episodio nº 24 (03-10 Junio 2006), observándose el régimen local de viento en O Saviñao y los aumentos diurnos de material particulado y SO<sub>2</sub> cuando el viento rola al NO en la estación C9-Mourence”

En resumen, se trata de un episodio con una importante contribución de la generación fotoquímica local a la inmisión de ozono, a la que se debe sumar el transporte de masas de aire envejecidas y con un alto nivel de contaminantes desde el sur peninsular (Portugal y suroeste de España), que ejercen un mayor efecto en el sur de la Comunidad Autónoma de Galicia. Aún así, es difícil establecer con seguridad el origen del episodio, debido a la falta de estaciones representativas, siendo las causas mencionadas las que tienen una mayor probabilidad.



## b) Período nocturno

Los episodios que presentan persistencia de ozono en la estación B2, considerada como un descenso inferior al 10% de la inmisión durante la madrugada, representan el 50% del total de episodios, mostrando un ligero descenso de la concentración de ozono a lo largo de dicha noche (episodios nº 6, nº 14, nº 20, nº 22, nº 23, nº 26 y nº 31) o incluso un aumento de la misma (episodios nº 7, nº 10-12, nº 16, nº 18, nº 24, nº 28 y nº 30). El 50% restante corresponde a episodios “sin persistencia”, repartiéndose entre episodios con una disminución de los valores de ozono entre el 10% y el 20%, que constituyen el 21.9 % del total de casos analizados, y episodios con descensos superiores al 20%, que suponen el 28.1% del conjunto de 32 episodios.

### b1) Episodios con persistencia nocturna de ozono

El “mantenimiento” de la inmisión de ozono troposférico durante la noche está siempre acompañado de breves pero notables repuntes de la concentración nocturna del contaminante (duración de 1 a 5 horas e incrementos por encima de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el 75% de los episodios de este grupo), incluso en aquellos casos en que los niveles absolutos de ozono nocturno disminuyen. Estos máximos relativos durante la noche también se registran durante la madrugada de la jornada previa a la que registra el máximo, aunque su frecuencia e intensidad es menor (aparecen en casi el 82% de estos episodios, frente al 100% de la madrugada correspondiente a la jornada del máximo, y sólo en el 37% de las ocasiones es superior a los  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), obedeciendo por ello a un proceso de duración temporal importante, no a un mero fenómeno puntual. Del mismo modo, se trata de un fenómeno con un dominio espacial relativamente importante, ya que se observa una correlación positiva significativa (coeficiente de correlación de Spearman de 0.34, significativo al nivel del 5%) con la persistencia nocturna en la estación F2, situada a unos 25 km de B2, y de características semejantes, utilizando los 32 episodios analizados.

La persistencia de los niveles de ozono en la estación B2 durante estos episodios puede deberse a varias causas (escasa intensidad de procesos clásicos de limpieza por deposición seca, o por reacción química con otras especies contaminantes, como NO, etc.), pero la aparición de estos incrementos relativos de ozono apunta hacia los procesos de transporte, dada la imposibilidad de formación fotoquímica durante la noche. Este transporte puede ser por advección horizontal, en el caso de que proceda de zonas limítrofes, o por entradas verticales, si procede de capas atmosféricas por encima de la capa estable nocturna debido al aumento de la inestabilidad.

Los episodios que cursan con persistencia nocturna no muestran ninguna característica diferenciadora con respecto a la situación sinóptica, aunque sí se observa una mayor frecuencia de situaciones de “Vaguada ibero-africana”, con un 25.0% de configuraciones de este tipo, y un descenso de la frecuencia de la configuración “Pantano barométrico”, con un 12.5%, frente al conjunto de episodios que no muestran persistencia, con frecuencias de 6.3% y 25.0%, respectivamente. El menor número de situaciones de “Pantano barométrico” puede obedecer al hecho de que esta configuración se caracteriza por la escasa intensidad de los flujos atmosféricos, lo cual favorece la inhibición de los procesos de transporte desde otras regiones, al ralentizarse notablemente la velocidad del viento.

En cuanto a las trayectorias de las masas de aire, tampoco se observa una mayor preponderancia de un recorrido u otro en función de si los episodios presentan o no persistencia, lo cual es consecuencia directa del reparto relativamente uniforme de las situaciones sinópticas entre ambos grupos de episodios. Únicamente aparecen diferencias apreciables en el dominio de las trayectorias de tipo “Franco-cantábrico” en los episodios que presentan persistencia (25.0% frente a 12.5%), y la baja frecuencia del origen “Mediterráneo – peninsular”, con 12.5% frente a 31.3%, que se explica por su fuerte asociación con la configuración del “Pantano barométrico”, dominante en los episodios sin persistencia. Sin embargo, destaca el hecho de que las trayectorias consideradas de origen “local” no sean claramente mayoritarias dentro de los episodios sin persistencia (25.0% en éstos, frente al 18.8% en el grupo de persistencia), pues se espera que estos episodios de origen local están gobernados por la generación fotoquímica de ozono, más que por fenómenos de transporte

susceptibles de provocar este tipo de persistencia caracterizada por sus máximos relativos nocturnos; esta situación podría indicar la existencia de un importante transporte de contaminantes a nivel local, desde zonas situadas a corta distancia, como las zonas urbano-industriales del “arco ártabro” que engloba Ferrol y A Coruña, o de las Rías Baixas, con el cinturón urbano de Vigo y sus industrias asociadas.

En relación con esta última cuestión, también es significativo el hecho de que el 87.5% de estos episodios que no presentan una disminución apreciable de los niveles nocturnos de ozono se engloben dentro de las categorías de “episodio progresivo de intensidad media o suave”, mientras que el grupo de episodios sin persistencia acoge al 83.3% del total de episodios “puntuales” y “progresivos de gran intensidad”. Esta diferencia vuelve a estar en consonancia con el hecho ya mencionado de que los episodios de tipo puntual o con incrementos bruscos de inmisión parecen presentar una apreciable contribución autóctona debida a la formación fotoquímica local, con un menor peso de los fenómenos de transporte alóctono.

Los episodios con persistencia nocturna presenta una característica meteorológica peculiar, como es la existencia de repuntes de temperatura durante la noche, que suelen acompañar a los incrementos de inmisión de ozono troposférico (figura 3.93). Esta circunstancia parece apoyar la teoría del transporte vertical, al sugerir una disminución del grado de estabilidad en la capa estable nocturna, u horizontal, si se relaciona con un cambio de la dirección del viento, lo cual podría provocar la entrada de masas de aire con diferente composición. El primer caso es el más habitual, ya que no son muchos los episodios que muestran rodamiento del viento NE al SO-NO durante la noche (episodios nº 7, nº 12, nº 14, nº 16, nº 23 y nº 30), siendo más común el mantenimiento de la dirección diurna, generalmente E-NE (figura 3.94). Por otra parte, la velocidad de viento durante la noche es muy baja en los episodios que presentan persistencia, habitualmente por debajo de los 3.5 m/s. Estos datos meteorológicos han sido analizados en la estación B2-Louseiras, elegida para el análisis de la persistencia nocturna de las series de ozono.

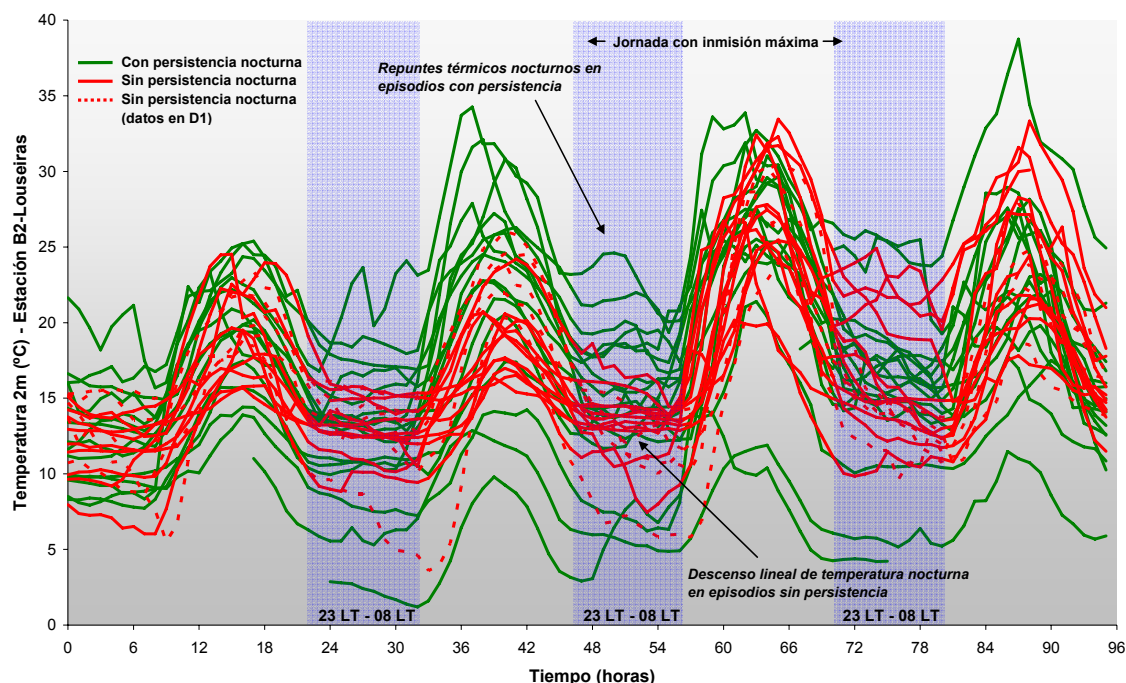


Figura 3.93: “Series temporales de temperatura en la estación B2-Louseiras, distinguiendo entre episodios con y sin persistencia nocturna. Las series abarcan 96 horas, incluyendo la jornada que registra el máximo episódico de inmisión de ozono, las dos jornadas previas a ésta y la jornada posterior. Se observa, en los episodios con persistencia nocturna, la presencia de aumentos relativos de temperatura nocturna durante la madrugada del día que registra el máximo episódico de ozono, mucho menos acusada o inexistente en la mayoría de episodios sin persistencia ”

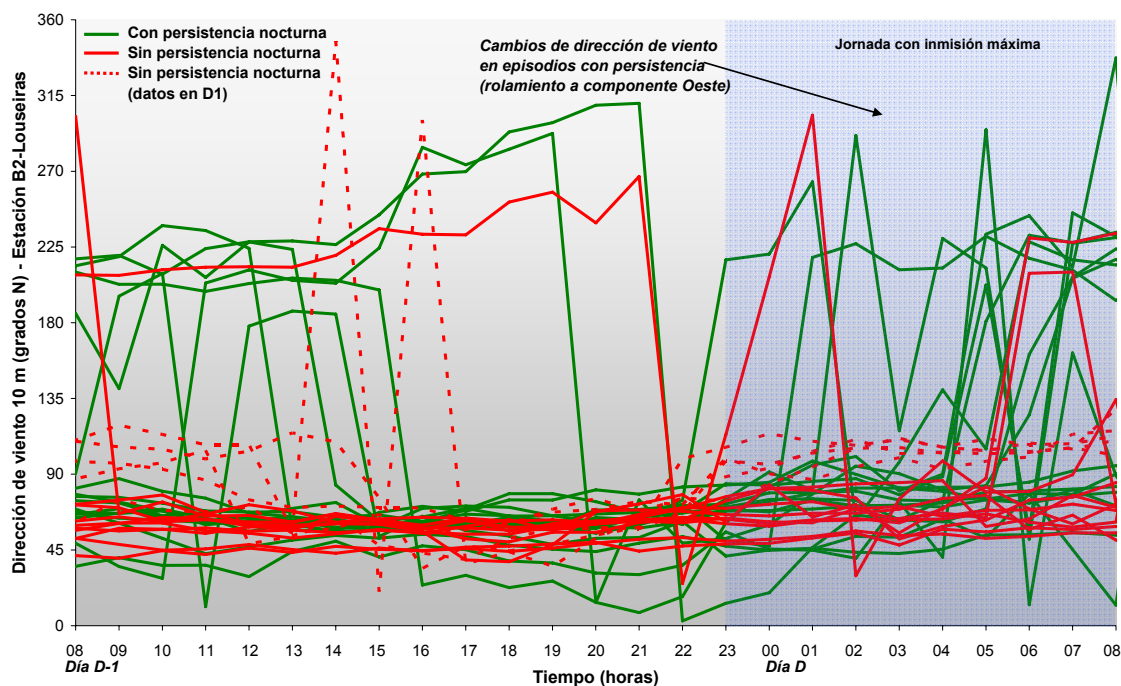


Figura 3.94: "Series temporales de dirección de viento en la estación B2-Louseiras, distinguiendo entre episodios con y sin persistencia nocturna. Las series abarcan 24 horas, entre las 08 LT de la jornada previa a la que registra el máximo episódico de inmisión de ozono (día D-1) hasta las 08 LT de la dicha jornada (día D). En los episodios con persistencia nocturna se observan frecuentemente cambios de dirección a componente Oeste durante la madrugada del día D, mientras en los episodios que no muestran persistencia el viento se mantiene constante de componente Este"

Un ejemplo de episodio con persistencia de ozono durante la noche, el episodio nº 11 (12-22 de Septiembre de 2003), ya ha sido brevemente analizado, durante el análisis meteorológico realizado en el apartado 3.5.4. A continuación se presenta otro ejemplo de este tipo de episodios, el episodio nº 23, del 04 al 11 de Octubre de 2005, en el cual se alcanza el máximo episódico a las 23 UTC (01 hora local) en la estación B2-Louseiras.

El episodio nº 23 (04-11 de Octubre de 2005) se caracteriza por el mantenimiento y aumento puntual de la concentración de ozono durante la noche en las estaciones rurales del norte de A Coruña, como B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, de modo que el máximo registro de ozono del episodio se alcanza en la estación B2-Louseiras a las 23 UTC (01 hora local) del 07 de Octubre de 2005, tras cinco horas consecutivas sin radiación solar. Los valores máximos obtenidos no son demasiado elevados, con un máximo de  $169 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero la persistencia de los niveles de ozono durante largos períodos provoca superaciones múltiples del umbral de protección a la salud humana, establecido por el Real Decreto 1796/2003 (Ministerio de la Presidencia, 2004) en un límite octohorario de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La figura 3.95 muestra la evolución del ozono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno en las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, mostrando los importantes incrementos de ozono que se producen principalmente durante las madrugadas de los días 7 y 8. En la estación B2-Louseiras, estos aumentos nocturnos registran una amplitud entre 45 y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en un corto período de tiempo, entre 3 y 6 horas, siendo inferiores en la estación F2-Fraga Redonda, con aumentos entre 30 y  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 5-6 horas. Obviamente, estos aumentos de ozono no pueden ser debidos a la generación fotoquímica, debido a la ausencia de radiación solar, y tampoco parecen achacables al transporte advectivo horizontal de contaminantes desde otras zonas, pues no se aprecian aumentos simultáneos de otros contaminantes primarios que puedan ser utilizados como trazadores, como el  $\text{SO}_2$ . Sin embargo, la elevación de los niveles de ozono troposférico durante la noche se ajusta bastante bien a las disminuciones de  $\text{NO}_2$ , lo cual apunta hacia una reducción del consumo de ozono por falta de óxidos de nitrógeno disponibles. Aún así, la disminución de la tasa de consumo superficial no justifica el aumento de ozono, sino su mantenimiento; por tanto, el aporte de ozono que

provoca los máximos relativos y absolutos durante la noche podría proceder del ozono almacenado en las capas altas de la atmósfera, que al disminuir la estabilidad de la capa estable nocturna, alcanza el estrato superficial aumentando los valores de inmisión. Este hecho sugiere que existen elevadas concentraciones de ozono en la capa estable nocturna o en la capa residual, que alcanzan la superficie si disminuye el grado de estabilidad. Este aumento de inestabilidad nocturna no ha podido comprobarse empíricamente, dada la falta de medidas meteorológicas en altura en aquellas zonas donde se produce el fenómeno.

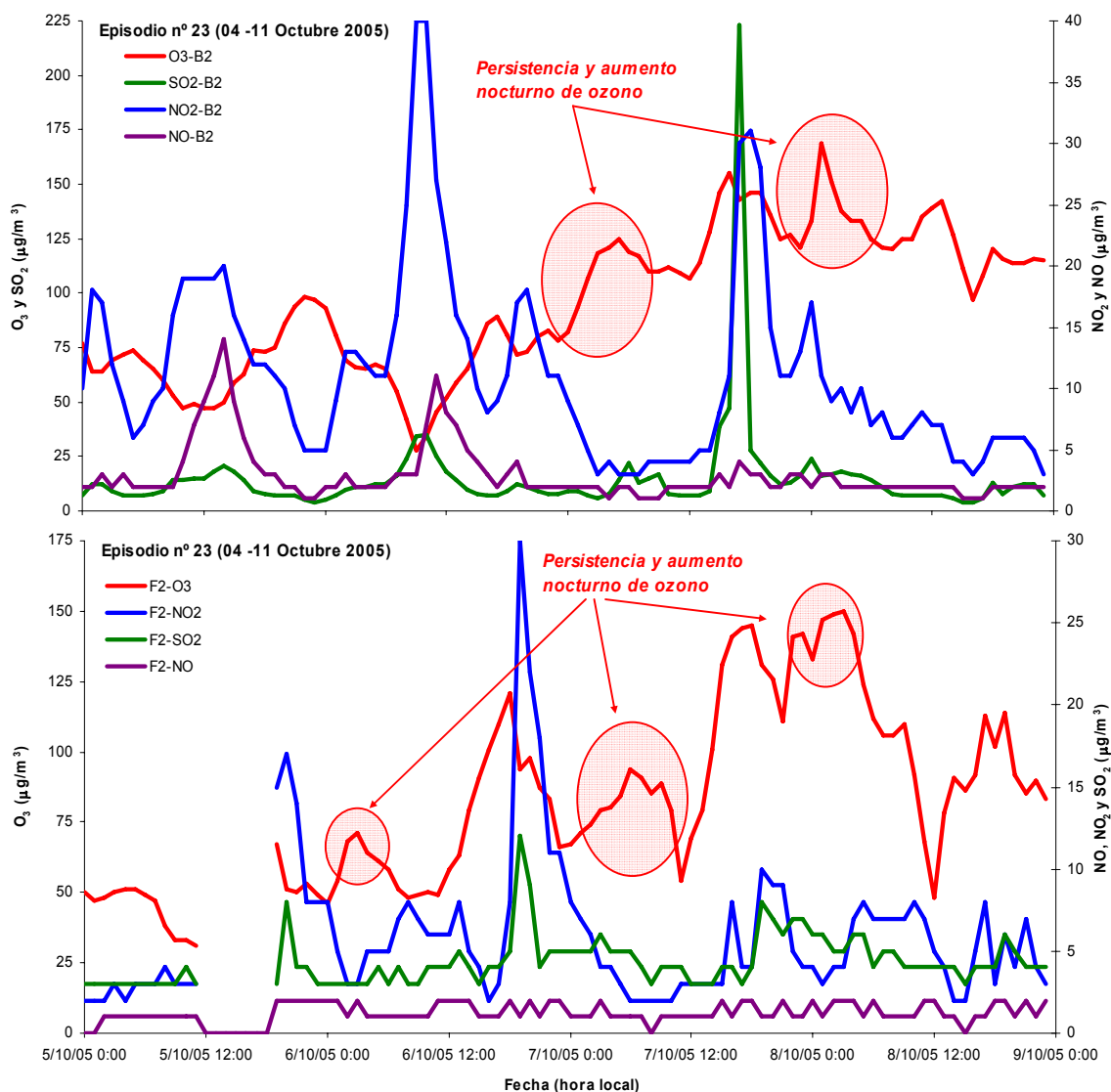


Figura 3.95: "Series temporales de O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y NO en la estación B2-Louseiras (arriba) y F2-Fraga Redonda (abajo), para las cuatro jornadas centrales del episodio nº 23 (04-11 de Octubre de 2005), destacando los incrementos nocturnos de ozono coincidentes en ambas estaciones"

A pesar de la falta de comprobación experimental, existen algunos indicios de la posible acumulación de ozono en estratos superiores durante este episodio, y de un posible aumento de la turbulencia durante la noche:

- La configuración sinóptica durante las jornadas centrales del episodio (figura 3.96) está dominada por el anticiclón británico-escandinavo, centrado sobre el mar Báltico, que se va desplazando progresivamente hacia el nordeste, disminuyendo su influencia sobre el

noroste peninsular. Esta situación conduce al establecimiento de un débil gradiente barométrico sobre el cuadrante noroeste de la península Ibérica, lo cual limita la renovación de las masas de aire, que se enriquecen progresivamente en compuestos contaminantes, debido a la baja intensidad de viento asociada.

07OCT2005 00Z

*500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)*

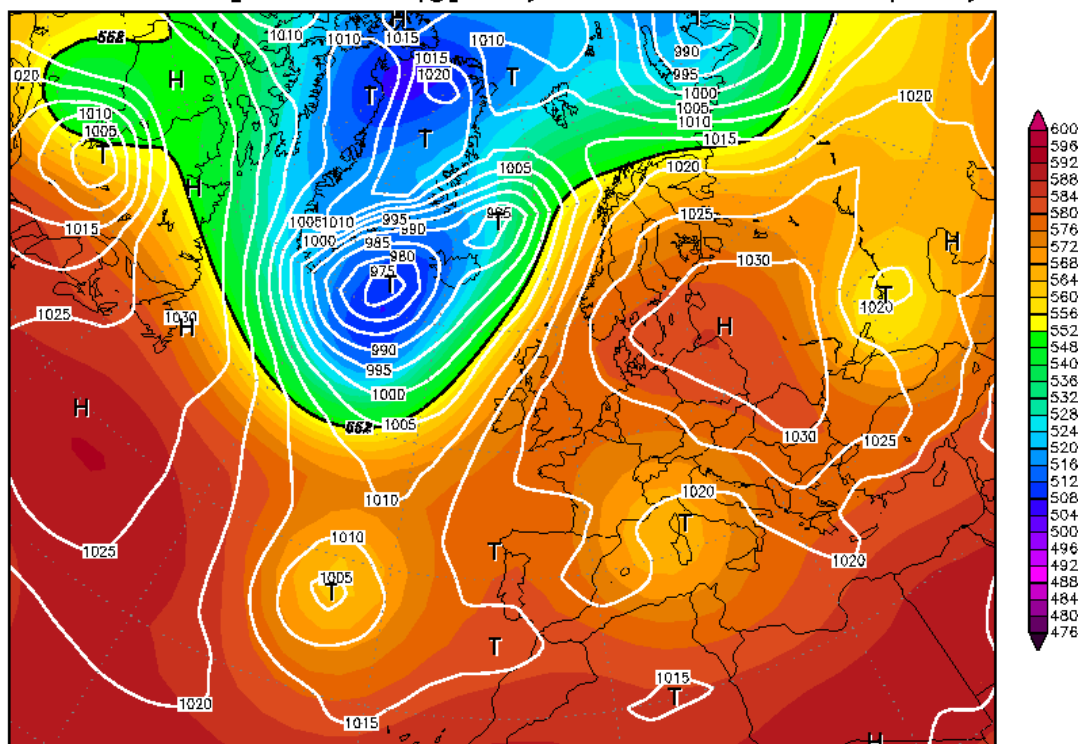


Figura 3.96: "Mapa sinópticos de superficie y a 500 hPa para uno de los días centrales del episodio nº 23 (04-11 de Octubre de 2005), mostrando una configuración de 'Anticiclón Británico-Escandinavo', con débil gradiente barométrico y ligera inestabilidad sobre el noroeste peninsular. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)"

- b) La retrotrayectoria (figura 3.97, derecha) calculada para la noche del día central (jornada 7, a las 23 UTC) de este episodio, presenta un corto recorrido sobre el noroeste peninsular, partiendo desde la costa oriental asturiana hasta alcanzar el norte de A Coruña, tras recorrer el interior de Galicia. Esta trayectoria es una muestra de la recirculación de las masas de aire sobre el territorio gallego, relacionada con la escasa intensidad de viento sinóptico y el dominio de fenómenos locales de viento. Sin embargo, la retrotrayectoria simulada para la madrugada del día 7 (figura 3.97, izquierda), período en el que se produce el primer aumento notable de ozono nocturno del episodio, 20 horas antes del registro máximo recogido por la retrotrayectoria analizada previamente, indica trazas de transporte desde el litoral cantábrico, el oeste de Francia y el entorno del golfo de Vizcaya. Aún así, este transporte no parece ser la principal contribución al primer máximo nocturno detectado, porque el recorrido de las masas de aire durante las 24 horas previas al establecimiento del máximo relativo de las 03 UTC del día 7 es muy limitado, según se observa en la parte izquierda de la figura 3.97. Además, la costa oeste de Francia recorrida durante los días previos presentó cielos cubiertos y precipitaciones durante ese período, debido a un centro de bajas presiones situado sobre el golfo de Génova, con lo cual el ozono disponible debería ser bastante limitado. En resumen, las retrotrayectorias muestran permanencia de las masas de aire sobre el noroeste peninsular, de modo que la procedencia del ozono que origina el episodio podría situarse en un área que incluye Galicia y las provincias limítrofes orientales (Asturias, León, etc.).



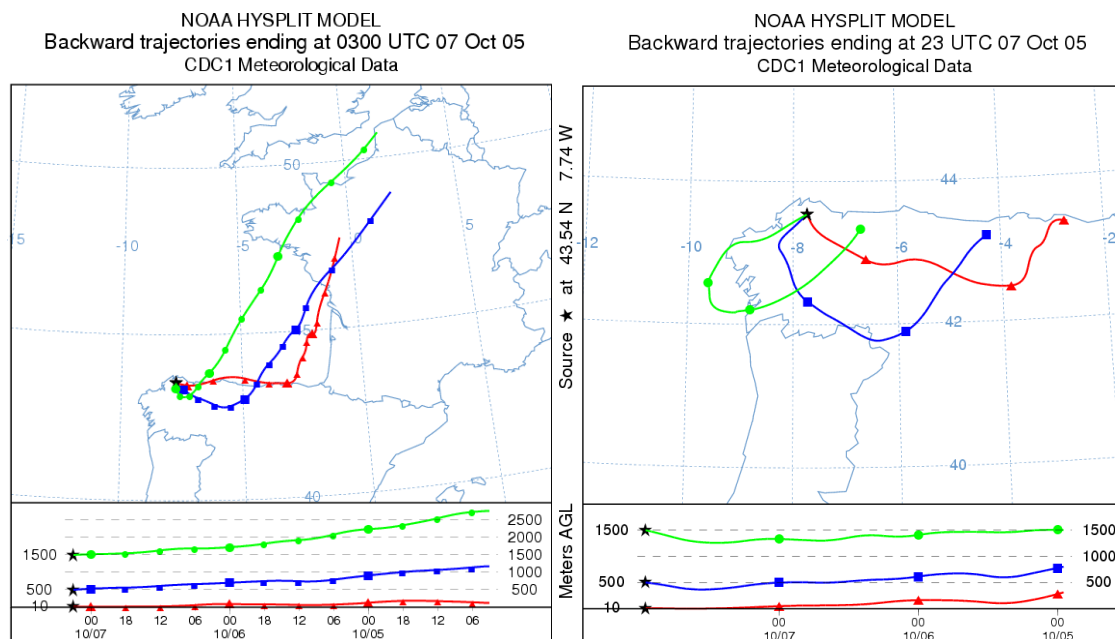


Figura 3.97: “Trayectorias con llegada en la estación B2-Louseiras a las 03 UTC y a las 23 UTC del día 07/10/05, respectivamente, y origen 72 horas antes. Los distintos colores indican las alturas de llegada establecidas (rojo a 100 m, azul a 500 m y verde a 1500 m)”

- c) La meteorología dominante durante este período se caracteriza por el establecimiento de regímenes locales de viento (figura 3.98, arriba), a causa del débil forzamiento sinóptico, con brisas marinas en la estación F2-Fraga Redonda y vientos de valle - montaña en B2-Louseiras, y bajas velocidades de viento, lo cual contribuye a mantener los estratos de aire sobre la mismas zonas, contribuyendo al enriquecimiento en contaminantes durante varios días, debido a la recirculación y envejecimiento de las masas de aire. Por otra parte, los repuntes nocturnos de ozono, coincidentes en el tiempo en ambas estaciones, tienen lugar con direcciones opuestas de viento en ambas estaciones (SO en B2-Louseiras y E en F2-Fraga Redonda), de modo que es difícil achacar este aumento a un transporte advectivo horizontal.
- d) Los incrementos de ozono durante la noche están acompañados por ligeros aumentos de la temperatura superficial, entre 0.5 y 1.5 °C (figura 3.98, abajo), consituyendo un posible indicio de la disminución de estabilidad nocturna, lo cual favorecería la mezcla vertical de contaminantes situados en estratos superiores.

En resumen, este episodio podría considerarse de carácter local, teniendo como principal causa la acumulación y recirculación de ozono formado sobre el área de estudio (litoral atlántico urbano-industrial y centrales térmicas próximas), aunque tampoco pueden descartarse pequeños aportes del este de Galicia.

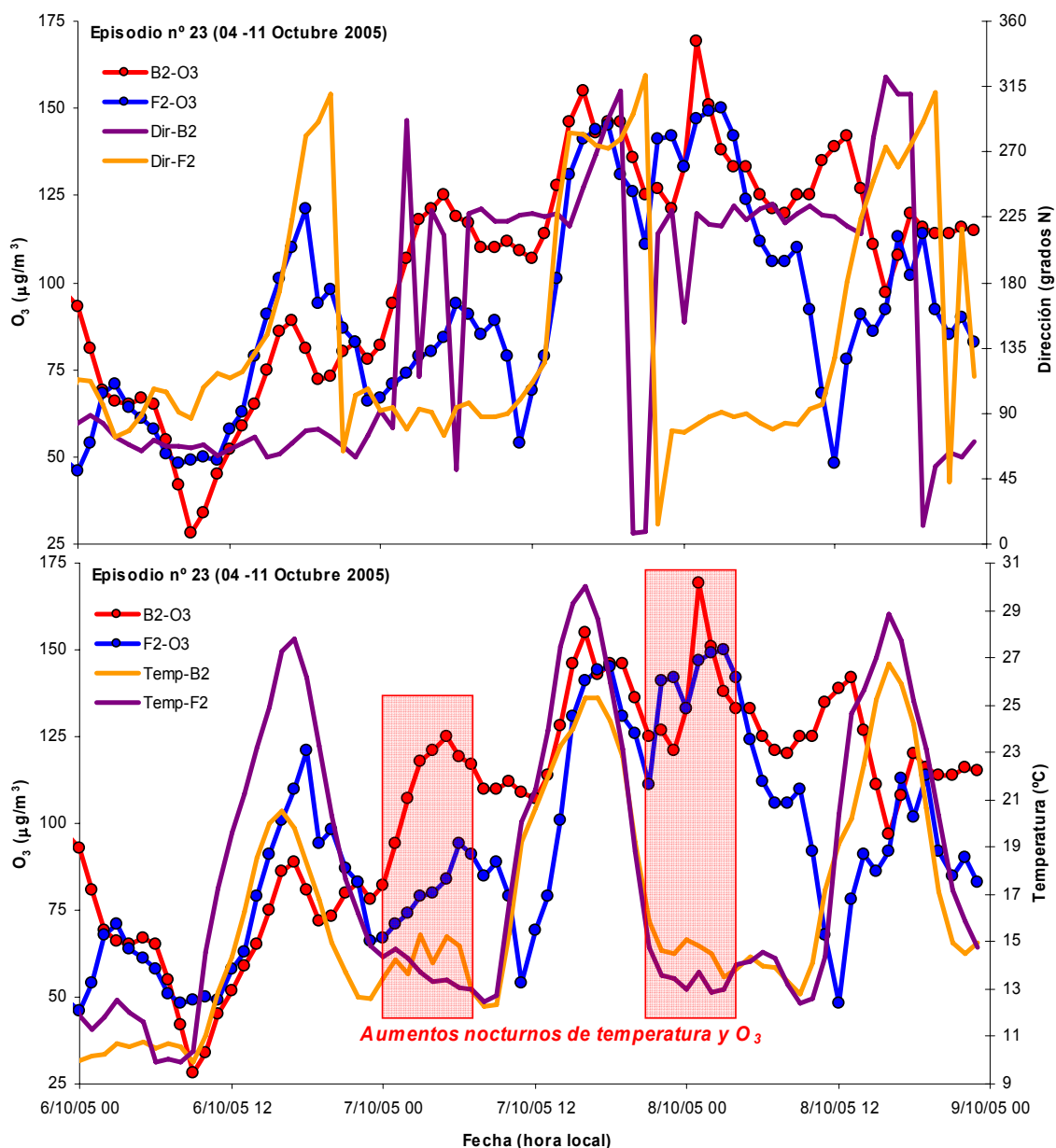


Figura 3.98: “Series temporales de O<sub>3</sub>, dirección de viento (arriba) y temperatura (abajo) en las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, para las tres jornadas centrales del episodio n° 23 (04-11 de Octubre de 2005), destacando los incrementos nocturnos de ozono coincidentes con repuntes térmicos en ambas estaciones”

## b2) Episodios sin persistencia nocturna de ozono

Los episodios que presentan un descenso apreciable de las concentraciones nocturnas de ozono, por encima del 10% entre las 23 UTC y las 04 UTC, constituyen la mitad del total de episodios analizados.

A diferencia del grupo de episodios caracterizados por el mantenimiento nocturno de los niveles de ozono, en estos episodios apenas se producen máximos relativos de la concentración nocturna de ozono durante la jornada que presenta el máximo episódico de inmisión de ozono, pues sólo aparecen en el 25% de ellos, y siempre son inferiores a 12 µg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, aumenta la frecuencia de estos máximos relativos en la madrugada del día anterior al que registra el máximo, alcanzando casi un 63% de casos, y el porcentaje de

episodios con repuntes nocturnos de ozono superiores a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  es igual al de los episodios caracterizados como persistentes, un 37%. Por tanto, la jornada previa muestra un comportamiento similar al mostrado en los episodios de carácter persistente, estableciéndose las diferencias entre ambos grupos en la jornada principal del episodio.

Tomando como referencia la estación B2-Louseiras, las diferencias en las medias de los máximos horarios absolutos de ozono superficial para ambos grupos son significativas al 1% según la prueba de Mann-Whitney, y claramente superiores en los episodios con persistencia, con un promedio de  $152.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y desviación típica  $25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , frente a los  $109.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de los episodios sin persistencia. Del mismo modo, si se calcula el promedio de los valores medios horarios de concentración de ozono para las dos categorías, tomando como horizonte temporal las 48 horas que incluyen la jornada del máximo y la jornada previa, también se observan diferencias claramente significativas, con valores promedio sensiblemente superiores para los episodios que presentan persistencia nocturna: promedio de  $89.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y desviación típica  $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y promedio de  $135.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con  $27.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de desviación típica para los episodios considerados sin persistencia y con persistencia, respectivamente. Es llamativo el valor tan elevado del promedio de 48 horas alcanzado en esta estación B2-Louseiras, si se considera que el límite legislativo de carácter octohorario para la protección de la salud humana son  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , según el Real Decreto 1796/2003 (Ministerio de la Presidencia, 2004).

Las situaciones sinópticas dominantes bajo las que se desarrollan estos episodios que no presentan persistencia de ozono durante la noche son las “Altas presiones sobre el océano Atlántico y Europa”, con una frecuencia del 43.8% y el “Pantano barométrico”, con un 25.0% de apariciones. La configuración de “Altas presiones sobre el océano Atlántico y Europa” no es significativa, dado que se trata de las condiciones dominantes durante la mayor parte de los episodios de ozono troposférico analizado, independientemente de su tipo, con un 40.6% de frecuencia global. En el caso del “Pantano barométrico”, las bajas velocidades de viento características de esta situación limitan los fenómenos de transporte, disminuyendo la posibilidad del mantenimiento de la inmisión de ozono. Por tanto, la configuración sinóptica no desempeña un papel preponderante en relación con el mantenimiento de los valores de ozono nocturno durante los episodios analizados, salvo en el caso de la situación de “Pantano barométrico”, lo cual es un reflejo de la clasificación sinóptica utilizada, de carácter genérico, poco específico, y de la intensa dependencia de este fenómeno con otros factores, como la meteorología local y las emisiones en otras áreas: cualquier situación sinóptica de las reflejadas en este análisis de episodios es susceptible de provocar transporte de masas de aire hacia el noroeste peninsular, pero existen múltiples condicionantes para que ese transporte derive en el mantenimiento de los valores de inmisión del ozono troposférico, y estos condicionantes pueden ser diferentes dentro de una misma situación sinóptica (gradiente barométrico más o menos intenso, desarrollo de regímenes locales de viento, dependientes del registro térmico, niveles de estabilidad, etc.) o independientes de la misma, como la emisión remota de contaminantes.

En cuanto a las retrotrayectorias relacionadas con los episodios sin persistencia, sólo destaca la mayor frecuencia de la trayectoria “Mediterráneo - Peninsular”, con respecto a los episodios con alto grado de persistencia, como ya se citó previamente. Sin embargo, es curioso que dos de los cinco episodios sin persistencia que presentan esta trayectoria (episodios nº 15 y nº 17), asociada al “Pantano barométrico”, sí presentan notables incrementos de ozono durante la noche, de modo que constituyen el máximo absoluto del episodio, a pesar de no existir persistencia en el conjunto del período nocturno. Ambos episodios, caracterizados por las calmas eólicas y por el mantenimiento (episodio nº 17) o ascenso (episodio nº 15, consultar apartado 3.5.4) de la temperatura nocturna, muestran un importante repunte de ozono que parece causado por el transporte vertical provocado por el debilitamiento de la capa estable nocturna, que facilita la mezcla del ozono almacenado en capas superiores. El transporte horizontal desde zonas alejadas parece difícil, ya que las velocidades de viento son muy bajas y no existe persistencia (se produce una importante caída de la concentración de ozono en las horas siguientes al registro máximo de ozono), aunque no se puede descartar la llegada de un flujo continuo de aire con altos contenidos en ozono troposférico desde áreas alejadas. Por tanto, la causa principal de ambos episodios parece estar relacionada con la generación fotoquímica diurna de ozono y posterior acumulación en altura, que alcanza la superficie



durante la noche debido a un incremento puntual del grado de inestabilidad. Como resumen, indicar que la ausencia de persistencia nocturna no elimina la posibilidad del transporte vertical puntual, en general más relacionado con los episodios que sí muestran persistencia, siendo menos frecuente el fenómeno de transporte alóctono de carácter advectivo en estos episodios no persistentes.

Las principales características asociadas a la meteorología local en los episodios sin persistencia son la frecuencia mucho menor de aumentos relativos de la temperatura nocturna (figura 3.93), velocidad de viento superior en general a la registrada en los episodios persistentes, y dirección de viento E-NE sostenida durante las horas nocturnas previas al registro del máximo, sin apenas cambios de dirección, a diferencia de los períodos con persistencia, en los cuales el rodamiento del viento a componente Oeste es frecuente (figura 3.94). El comportamiento clásico de la temperatura, con descensos continuos y lineales durante la noche, es indicativo de una mayor estabilidad de carácter térmico, al igual que el mantenimiento de la componente de viento supone una mayor estabilidad dinámica, con poca presencia de regímenes locales de viento, lo cual aumenta la “fortaleza” de la capa estable nocturna. Por otra lado, y en relación con la falta generalizada de persistencia en los episodios “puntuales” y “progresivos con aumentos intensos”, está el hecho de que la temperaturas máximas registradas en la jornada previa al máximo sean menores durante los episodios carentes de persistencia: suelen ser episodios en los que se produce un aumento súbito y acusado de la concentración de ozono, y de menor duración que los episodios progresivos con aumentos suaves y medios, debido al cambio de las condiciones meteorológicas que favorecen la generación autóctona de ozono troposférico, a diferencia del fenómeno dominante de transporte en los episodios con persistencia.

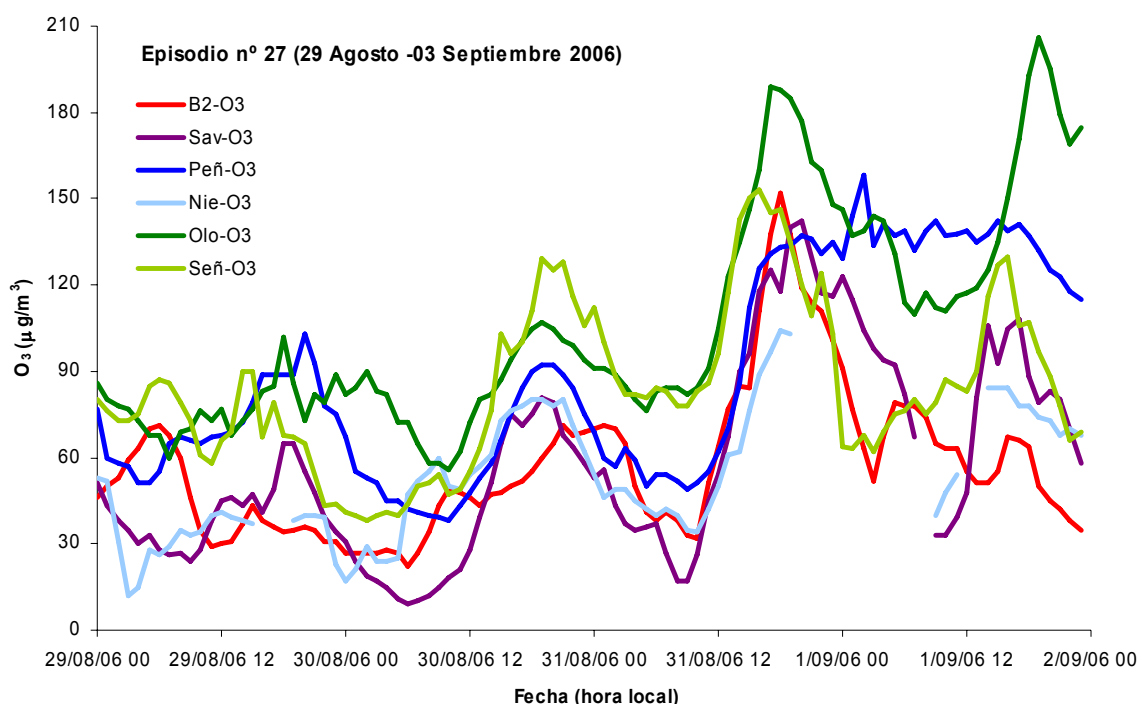


Figura 3.99: “Series temporales de concentración superficial de ozono en las estaciones B2-Louseiras, O Saviñao, Peñausende, Niembro, Lamas de Olo y Senhora do Minho, para los cuatro días centrales del episodio nº 27 (29 Agosto- 03 Septiembre 2006), destacando el notable incremento de los niveles de ozono medidos durante el día 31 de Agosto”

Un ejemplo de episodio sin mantenimiento de los valores nocturnos de ozono lo constituye el episodio nº 27, de 29 de Agosto al 03 de Septiembre de 2006. Este período presenta un importante aumento de la inmisión de ozono durante el día 31 de Agosto, de forma generalizada en todo el noroeste peninsular (Galicia, norte de Portugal, Asturias y Zamora),

según se observa en los datos históricos recogidos en la figura 3.99 y en las simulaciones realizadas por el modelo EURAD (figura 3.100). En este caso las estaciones rurales del norte de A Coruña, B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, no muestran valores persistentes de ozono durante las noches previas a la jornada 31, en la que se alcanza el máximo episódico, aunque la noche posterior sí se observa un ligero mantenimiento de la inmisión de ozono, pero irrelevante para el desarrollo del episodio.

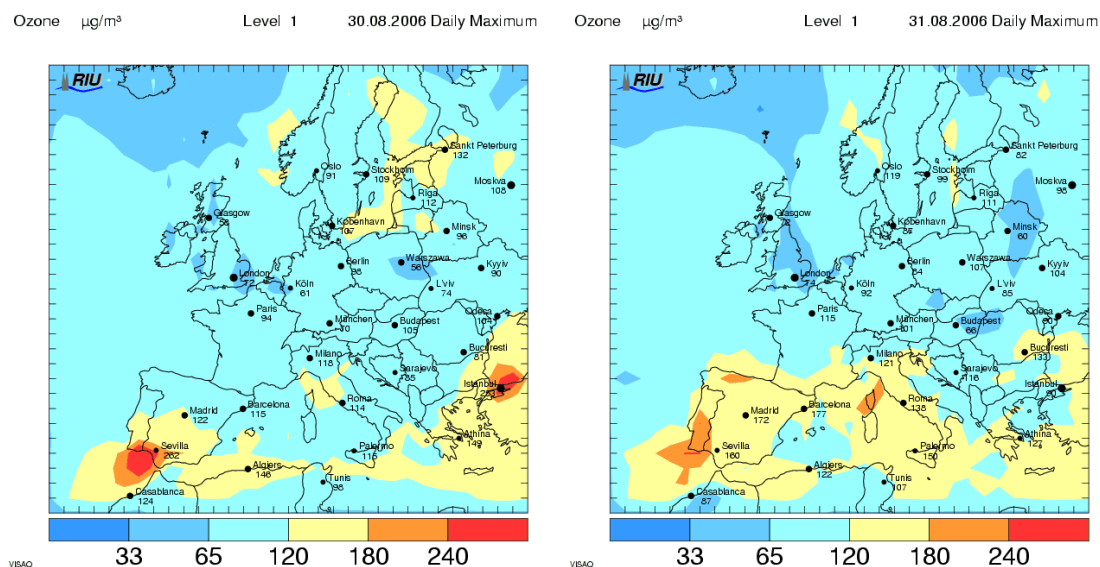
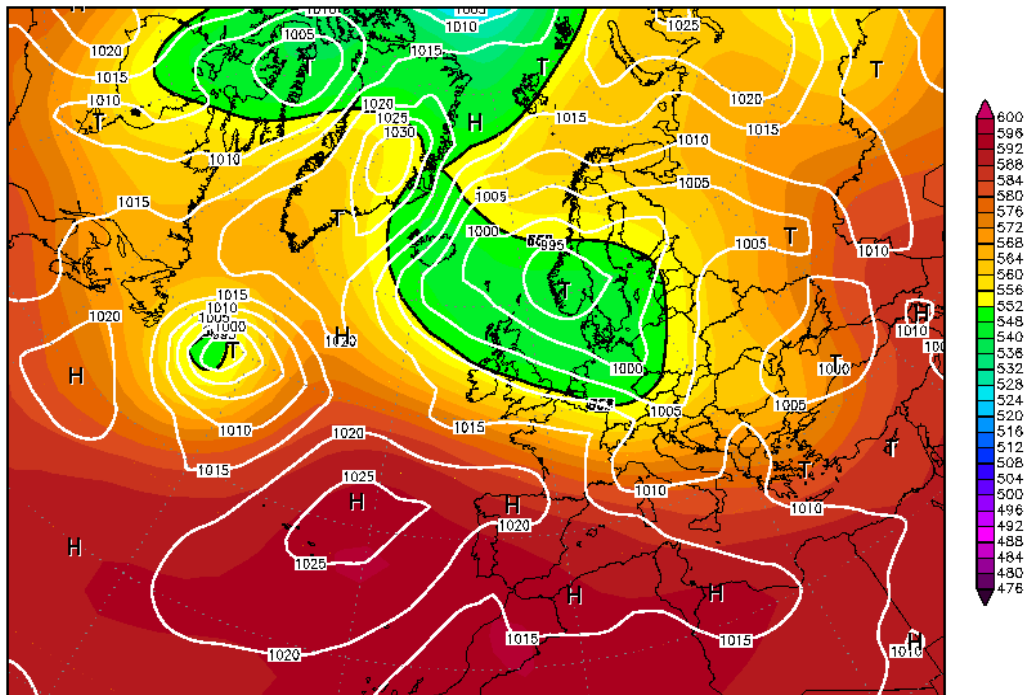


Figura 3.100: “Predicciones de calidad del aire (máximo horario de  $\text{O}_3$ ) sobre Europa occidental realizadas por el modelo EURAD para los días 30-31/08/2006”

Se trata de un episodio puntual, con un ascenso brusco de la temperatura, debido al cambio de las condiciones sinópticas, marcadas por un rápido desplazamiento del anticiclón de las Azores hacia Centroeuropa; este movimiento provoca un rolamiento hacia el E-SE del viento en el noroeste de la península Ibérica, inicialmente de componente NO, lo cual conlleva una importante disminución de la humedad y el acusado incremento térmico reseñado, estableciéndose incluso una baja térmica que afecta al tercio oeste peninsular (figura 3.101). Bajo estas condiciones, la generación local de ozono se ve muy favorecida, con lo cual los niveles aumentan bruscamente.

29AUG2006 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)



31AUG2006 00Z

500 hPa Geopotential (gpm) und Bodendruck (hPa)

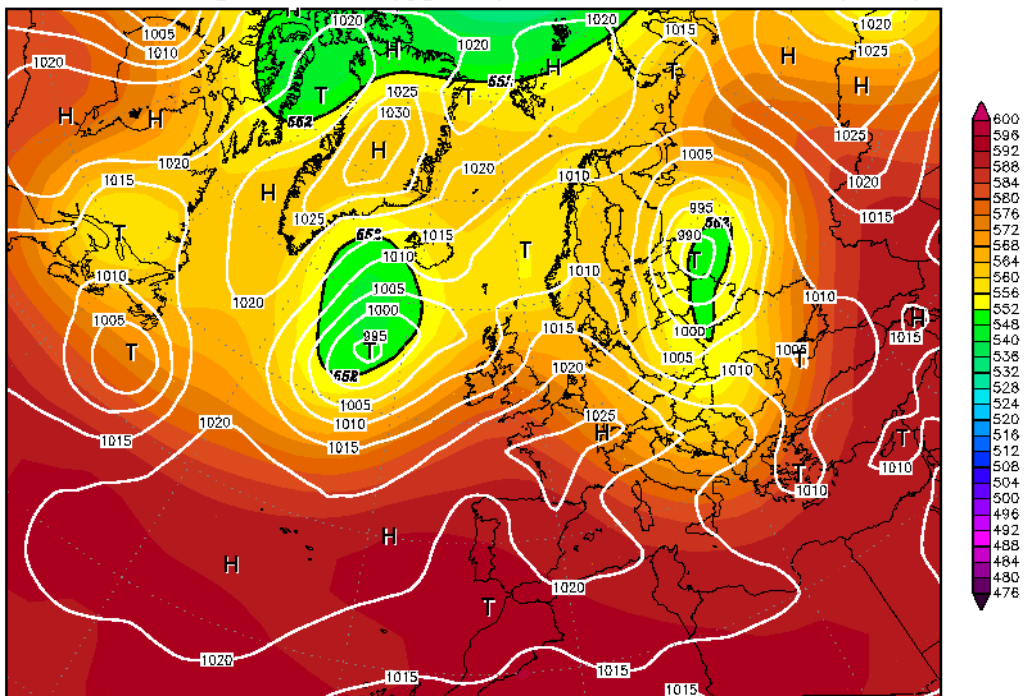


Figura 3.101: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa para los días 29 y 31 de Agosto (jornada central) del episodio nº 27 (29 Agosto - 03 Septiembre de 2006), mostrando el desplazamiento del anticiclón de las Azores hacia el Centroeuroa, estableciéndose una situación de vaguada ibero-africana” el día 31 de Agosto. Fuente: reanálisis NCEP (Wetterzentrale, 2010)”

Sin embargo, la escasa relevancia del transporte alóctono, debido a los bajos niveles previos de ozono en la península, los procesos de limpieza dominantes, causados por la elevada velocidad de viento, la mayor estabilidad térmica de la madrugada del día 31 (figura 3.102), así como la limitada formación fotoquímica local durante los días anteriores, debido a la meteorología desfavorable, impiden la acumulación y mantenimiento de ozono durante las noches previas. La situación cambia durante la noche del día 31 y madrugada del día 1, observándose cierta persistencia del ozono, acompañada de pequeños repuntes térmicos y una disminución de la estabilidad nocturna.

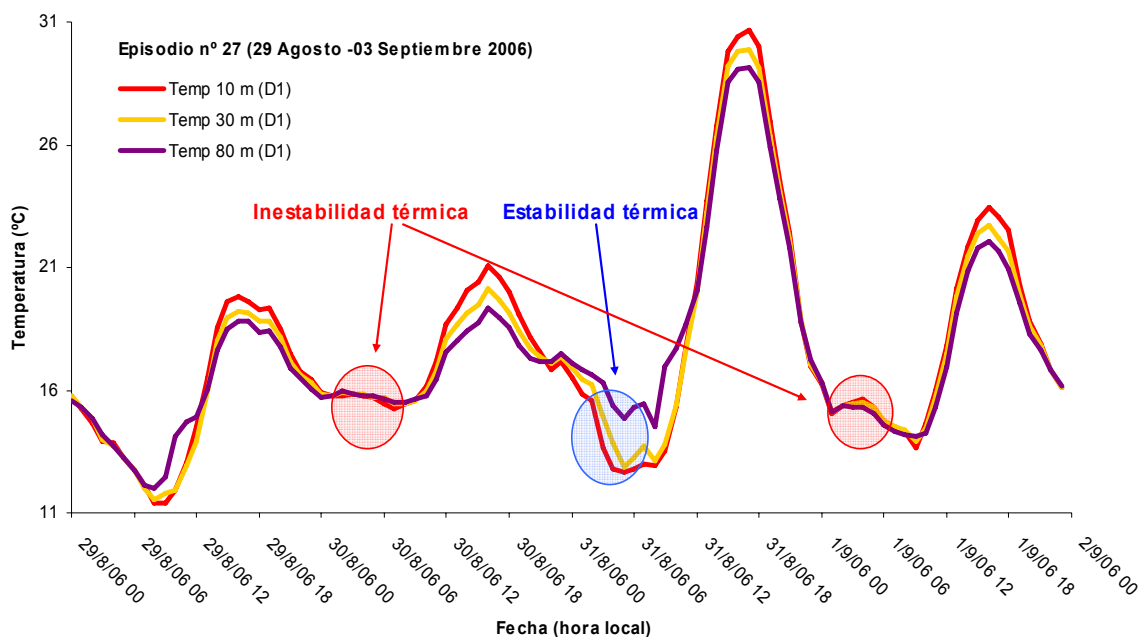


Figura 3.102: “Series temporales de temperatura a 10, 30 y 80 m en la estación D1-A Mourela para las cuatro jornadas centrales del episodios nº 27 (29 Agosto-03 de Septiembre de 2006)”

La figura 3.103 muestra el importante ascenso térmico producido el día 31, con temperaturas máximas 12 °C superiores con respecto a la jornada anterior en F2 - Fraga Redonda y 15 °C en B2-Louseiras, así como la apreciable disminución de intensidad del viento durante esa jornada. La dirección de viento dominante es E-NE durante la jornada previa al máximo, con una apreciable intensidad de viento, mientras que la elevación de temperatura provoca la aparición de vientos locales de componente O durante la tarde del día 31, coincidiendo con el establecimiento del máximo absoluto del episodio.

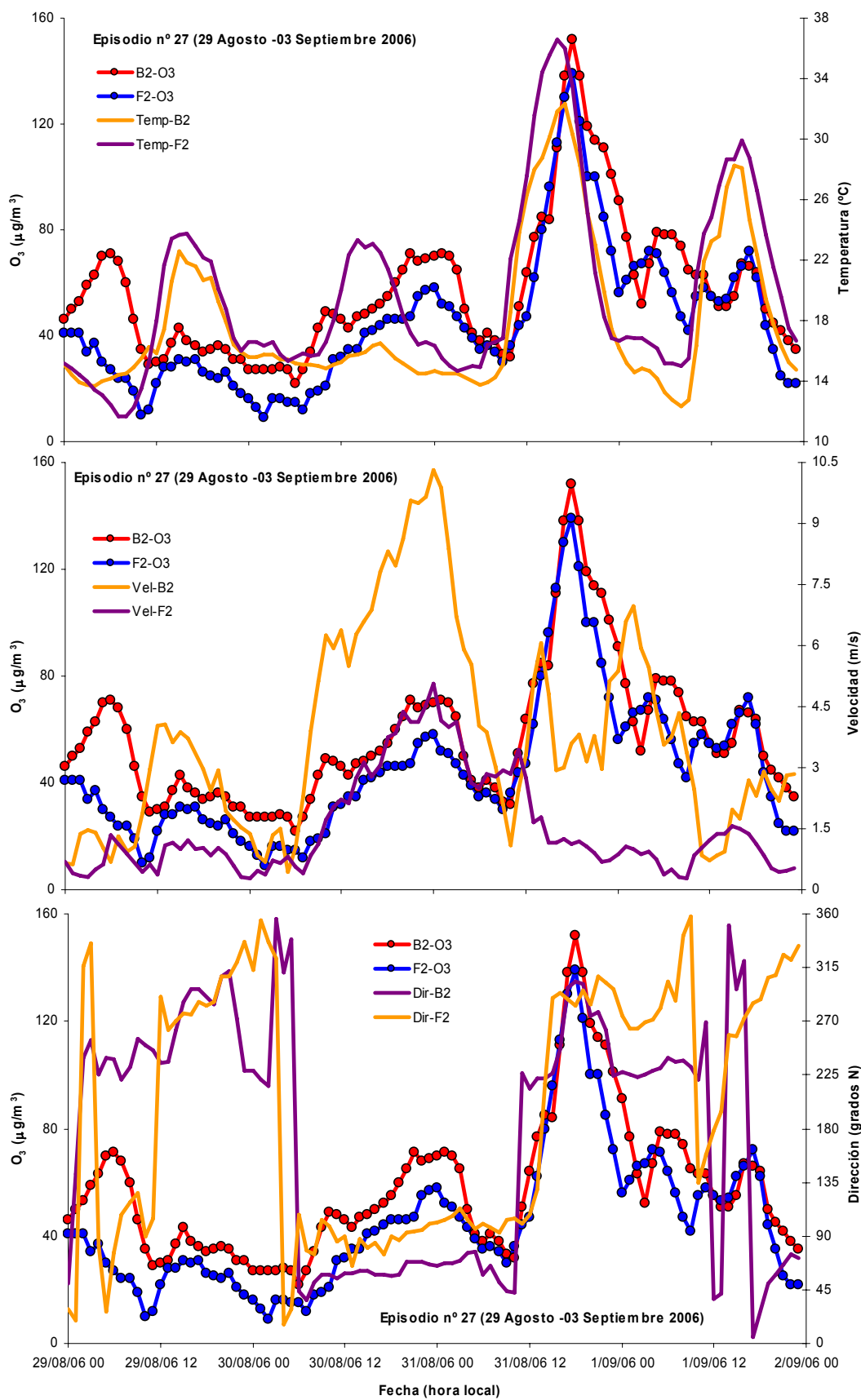


Figura 3.103: “Series temporales de  $O_3$ , temperatura (arriba), velocidad (medio) y dirección de viento (abajo) en las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, para las cuatro jornadas centrales del episodio n° 27 (29 Agosto-03 de Septiembre de 2006)”

El origen local de este episodio se ve apoyado por la distribución de contaminantes primarios, como el SO<sub>2</sub> o el NO<sub>2</sub>, cuyas concentraciones aumentan notablemente durante la tarde del día 30 y la jornada 31, contribuyendo en el caso del NO<sub>2</sub> a la formación de ozono troposférico (figura 3.104). La procedencia de estos contaminantes parece de origen local, debido a que los elevados valores puntuales de SO<sub>2</sub> registrados, acompañados de aumentos de la inmisión de NO<sub>2</sub>, corresponden a la emisión de centrales térmicas próximas, situadas en As Pontes y Meirama. De igual modo, las retrotrayectorias muestran una recirculación sobre el noroeste peninsular.

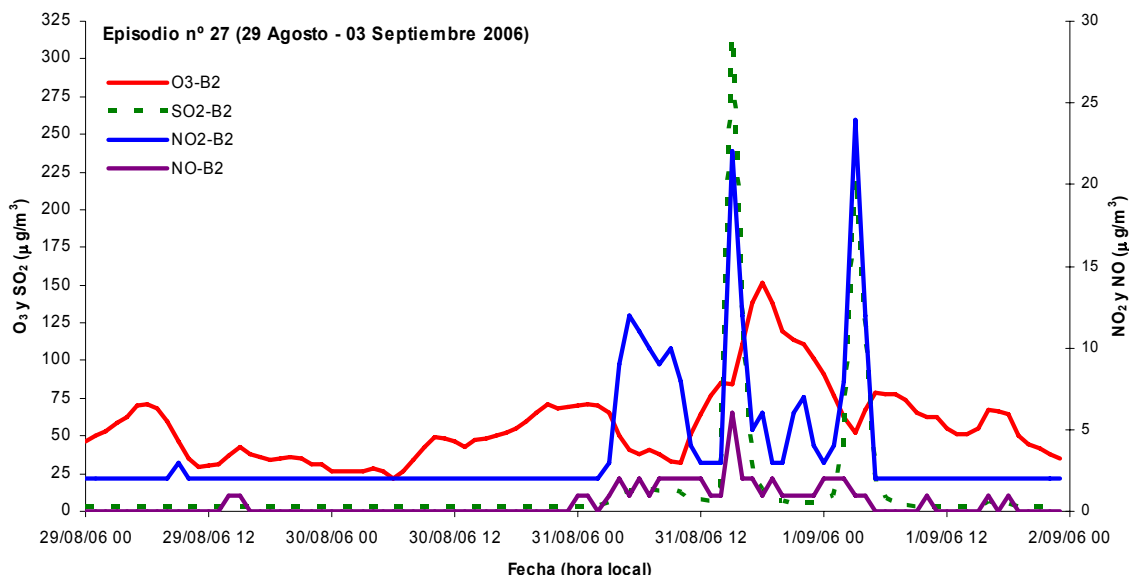


Figura 3.104: “Series temporales de O<sub>3</sub>, No, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> en la estación B2-Louseiras para las cuatro jornadas centrales del episodio nº 27 (29 Agosto-03 de Septiembre de 2006)”

En resumen, el episodio nº 27 (29 Agosto - 03 Septiembre 2006) se considera de tipo “puntual”, causado por la generación fotoquímica local, sin que se aprecie persistencia de los niveles nocturnos de ozono, debido a la breve duración del episodio y a la gran estabilidad nocturna favorecida por las condiciones meteorológicas locales, con altas temperaturas y escasa intensidad de viento. Estas características son típicas de la mayoría de los episodios sin persistencia de ozono nocturno.

### 3.6 Análisis de las causas y orígenes de los episodios identificados.

Este apartado consiste en una integración de todos los estudios parciales previamente realizados (meteorología sinóptica, meteorología local, análisis de trayectorias y análisis de medidas de inmisión), para realizar una aproximación a las causas principales de cada episodio, siendo el objetivo último la determinación del origen principal del ozono medido en cada uno de los períodos identificados en el norte de la provincia de A Coruña.

El establecimiento de un origen único y principal del ozono en cada uno de los episodios considerados presenta una elevada incertidumbre a partir de los datos disponibles, dados los múltiples factores a escala global (meteorología sinóptica y emisiones a escala europea) y regional - local (meteorología regional y local, emisiones locales), que afectan de modo espacial y temporal a la inmisión de ozono. Un modo de abordar este problema podría estar basado en la simulación de estos episodios con un modelo de calidad de aire, y el posterior desarrollo de un análisis de sensibilidad sobre parámetros tales como las emisiones de precursores de la contaminación fotoquímica en diferentes áreas.

Por su parte, los objetivos de este análisis están orientados a establecer los principales factores que afectan a la inmisión de ozono en cada episodio, para poder extraer los condicionantes principales en cada uno de ellos y establecer unas premisas globales que puedan servir de orientación para la detección y prevención de episodios en la Comunidad Autónoma de Galicia.

### *3.6.1 Criterios de análisis*

La clasificación de episodios a partir de su origen recoge los episodios cuya inmisión máxima horaria de ozono en una de las cinco estaciones de la Red de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T. Endesa-As Pontes alcance al menos  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; la aplicación de este criterio supone la inclusión de veintidós episodios en el análisis, pues por debajo de este umbral se complica la discriminación de su origen, al ser niveles próximos al ozono de fondo.

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo 2, se ha analizado el patrón de inmisión de ozono, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre (éste último como elemento trazador, al ser un contaminante primario sin importantes transformaciones secundarias), la meteorología local y sinóptica, incluyendo trayectorias de masas de aire, y las simulaciones realizadas por modelos de calidad de aire como EURAD y Chimere.

### *3.6.2 Tipos y clasificación de episodios*

La primera clasificación de episodios es su división en episodios de carácter autóctono o local, provocados por la generación fotoquímica de ozono a partir de precursores emitidos en el área de medida o zonas próximas a ésta, incluyendo como tal la totalidad de la Comunidad Autónoma Gallega, y episodios de carácter alóctono, causados preferentemente por transporte de ozono o precursores fotoquímicos desde regiones limítrofes más o menos alejadas.

El segundo paso, que constituye un refinamiento de la clasificación anterior consiste en, si es posible, proponer un área de origen del ozono o precursores para aquellos episodios considerados como alóctonos. Se han considerado las siguientes zonas como potenciales fuentes de contaminación con efectos sobre Galicia, una vez analizados todos los episodios:

- la Meseta Norte peninsular, a causa de su importante número de instalaciones industriales de combustión, destacando las centrales térmicas de carbón existentes en el entorno de Ponferrada y León
- la costa cantábrica, pues su situación al este de Galicia y la dirección E-NE del viento sinóptico, predominante en época estival y primaveral, la sitúan como una de las principales áreas de aporte de masas de aire hacia el noroeste peninsular, además de tener importantes núcleos industriales, como el País Vasco, o áreas puntuales en Asturias
- el sur de Galicia, siendo Portugal la principal área fuente de ozono, debido a los altos niveles que se suelen registrar durante el verano en la región norte (Carvalho et al., 2010; Evtyuguina et al., 2006 y 2009) y en el litoral atlántico

Existen otras posibles fuentes de contaminación, más alejadas, como el área del Canal de la Mancha, con el sur de las Islas Británicas, los Países Bajos y el litoral alemán, o áreas de Centroeuropa, pero su contribución es más difícil de determinar, y las masas de aire procedentes de esas zonas en general han de pasar por alguna de las tres anteriores, de modo que su influencia puede adscribirse a alguna de estas ya consideradas.

Las tablas 3.10 y 3.11 muestran respectivamente la clasificación de episodios según su origen y la distribución de las áreas geográficas que se han considerado origen del ozono transportado, en el caso de los episodios con influencia externa por transporte de ozono.

Origen	Influencia	Episodios	Total	Porcentaje (%)	
Local	Sin influencia externa destacada	10, 12, 14, 21, 27, 28	6	27.3	<b>27.3</b>
Local con influencia alóctona	Meseta y Este peninsular	3, 7, 8, 25	4	18.2	<b>45.4</b>
	Portugal	18, 24, 32	3	13.6	
	Litoral cantábrico	13, 23, 29	3	13.6	
Alóctono	Sur de España y Portugal	1, 11, 19	3	13.6	<b>27.3</b>
	Meseta y Este peninsular	15, 26	2	9.1	
	Litoral cantábrico	20	1	4.5	

Tabla 3.10: Clasificación por origen de los veintidós episodios con niveles de inmisión horaria de ozono superior a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , indicando el porcentaje correspondiente a cada tipo. Dentro de los episodios locales, se han distinguido aquellos que, a pesar del dominio de la generación fotoquímica local de ozono, también están afectados por el transporte de ozono desde áreas externas. En el caso de los episodios alóctonos, se indica la principal área fuente del ozono transportado hacia el noroeste peninsular.

Origen	Influencia	Episodios	Total	Porcentaje (%)	
Alóctono	Meseta y Este peninsular	3, 7, 8, 15, 25, 26	6	<b>37.5</b>	
	Sur de España y Portugal	1, 11, 18, 19, 24, 32	6	<b>37.5</b>	
	Litoral cantábrico	13, 20, 23, 29	4	<b>25.0</b>	

Tabla 3.11: Clasificación de los dieciséis episodios afectados por el transporte de ozono alóctono, establecida a partir del área fuente del ozono transportado hacia el noroeste peninsular. Se han considerado sólo los episodios que presentan, niveles de inmisión horaria de ozono superior a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , incluyendo episodios de carácter local pero con notable influencia del ozono transportado.

### *Episodios de carácter local*

Obviamente todos los episodios considerados presentan, en mayor o menor medida, una clara componente local, debido al gran número de fuentes de emisión presentes en las zonas costeras de la Comunidad Autónoma de Galicia, tanto fuentes puntuales, entre las que destacan las grandes instalaciones productoras de energía mediante combustión de carbón o fuel, refinerías y metalurgias (Casares et al., 2005), como áreas difusas considerando como tales el transporte rodado y las grandes masas forestales productoras de compuestos orgánicos volátiles, entre otras. Sin embargo, algunos episodios, dados sus especiales condicionantes meteorológicos, no parecen presentar contribuciones externas apreciables, de modo que se puede considerar que los altos niveles de ozono registrados son debidos en su mayor parte a la transformación fotoquímica de precursores de ozono suministrados por las actividades industriales gallegas. Esta es la razón por la cual estos episodios se consideran de carácter local exclusivamente.

Los seis episodios siguientes se han clasificado como episodios causados principalmente por la generación fotoquímica de ozono en Galicia, a partir de contaminantes primarios emitidos en el área de estudio: episodio nº 14 (12-19 Junio de 2004), nº 10 (30 Julio-16 Agosto de 2003), nº 12 (31 Mayo-11 Junio de 2004), nº 28 (03-09 Septiembre de 2006), nº 27 (29 Agosto-03 Septiembre de 2006) y nº 21 (29 Agosto-04 Septiembre de 2005).



No puede establecerse como una situación sinóptica propia de los episodios locales, al no existir una única configuración sinóptica común y característica para este tipo de episodios, más allá de aquellas condiciones anticiclónicas que causan la aparición de factores meteorológicos favorables para la generación fotoquímica de ozono (radiación solar elevada, altas temperaturas, intensidad suave de viento, estabilidad atmosférica, etc.). En los episodios cuyo origen se debe al transporte alóctono de ozono, el cuadrante o sector de origen del ozono se establece en función de la dirección del flujo atmosférico, que desempeña un papel primordial en la procedencia del ozono; obviamente, esta propiedad limita el número de configuraciones sinópticas atribuibles a cada tipo de episodio, descartando todas aquellas configuraciones en las cuales la componente del flujo no coincida, al menos durante un período temporal más o menos largo, con el área de origen que da lugar a la clasificación del episodio. No obstante, esta situación no impide que puedan existir varias situaciones sinópticas diferentes para cada clase de episodios provocados por la advección de aire enriquecido en ozono, al originar todas ellas una misma dirección de viento sinóptico. Sin embargo, en el caso de los episodios de tipo local, la dirección del flujo atmosférico no es una variable tan fundamental para su clasificación inicial pues, salvo en el caso en que produzca una recirculación intensa de las masas de aire sobre el área de estudio, cualquier trayectoria seguida por las masas de aire puede ser compatible con dichos episodios, siempre y cuando se trate de masas poco enriquecidas en ozono, no susceptibles de causar por sí mismas una importante elevación de los niveles de inmisión en el área de estudio. Por tanto, los episodios de carácter local pueden desarrollarse bajo un número más amplio de situaciones sinópticas anticiclónicas que los episodios alóctonos, aunque serán más frecuentes aquellas situaciones que tiendan a provocar recirculación de masas de aire, o bien un pequeño desplazamiento de éstas.

En este caso, los episodios clasificados como locales son una muestra de ello, pues abarcan configuraciones sinópticas dispares (figura 3.105, arriba), a pesar de que todas ellas tienen en común su carácter anticiclónico y un gradiente bórico poco acusado, llegando incluso al pantano barométrico en el episodio nº 28: “Vaguada ibero-africana” en los episodios nº 12 y nº 27, mientras los episodios nº 14, nº 10 y nº 21 se desarrollan bajo “Altas presiones en el Atlántico y Europa”.

La dependencia directa de las retrotrayectorias con la evolución de las condiciones sinópticas durante las 72 horas previas al registro del máximo episódico de ozono provocan también que existan múltiples tipos de trayectorias diferentes en los episodios locales (figura 3.105, abajo), aunque se espera el predominio de trayectorias con cierto grado de recirculación. En los episodios considerados esta recirculación se aprecia claramente en las trayectorias de los episodios nº 10, nº 27 y nº 28 (sólo a 500 m), mientras los episodios nº 12 y nº 21 presentan trayectorias procedentes del golfo de León cruzando todo el tercio norte peninsular por el norte de la meseta castellana, y del sur de Portugal a través del litoral portugués, respectivamente. El episodio nº 14 presenta una trayectoria atípica, indicando un recorrido de las masas de aire desde Irlanda, atravesando el oeste de Inglaterra y la Bretaña francesa, para entrar en la península Ibérica por el litoral cantábrico occidental.

La meteorología local sí muestra algunos parámetros significativos, destacando los elevadas temperaturas registradas, siempre superiores a los 30 °C en las estaciones que registran los máximos de ozono, y que incluso llegaron a alcanzar unos inusuales 36-38 °C en puntos del norte de Galicia durante las jornadas centrales de los episodios nº 14, nº 28 y nº 27. La velocidad de viento es bastante variable de unos episodios a otros, al estar notablemente afectada por fenómenos locales de tipo térmico, como las brisas, más que por el forzamiento sinóptico; sin embargo, durante estos seis episodios predominan las bajas velocidades de viento, por debajo de los 7-8 m/s a 80 m en la estación D1-A Mourela, de acuerdo con el débil gradiente de presión típico de estos episodios. La dirección de viento está dominada por el desarrollo de vientos locales de carácter térmico (episodios nº 28, nº 14, nº 10 y nº 12), como las brisas costeras, que favorecen la recirculación de las masas de aire y su permanencia sobre el litoral y las brisas de valle-montaña, con un régimen semejante en zonas del interior, afectando a estaciones como B2-Louseiras. La dirección sinóptica del viento es de componente Este en todos los episodios, oscilando entre NE y SE.

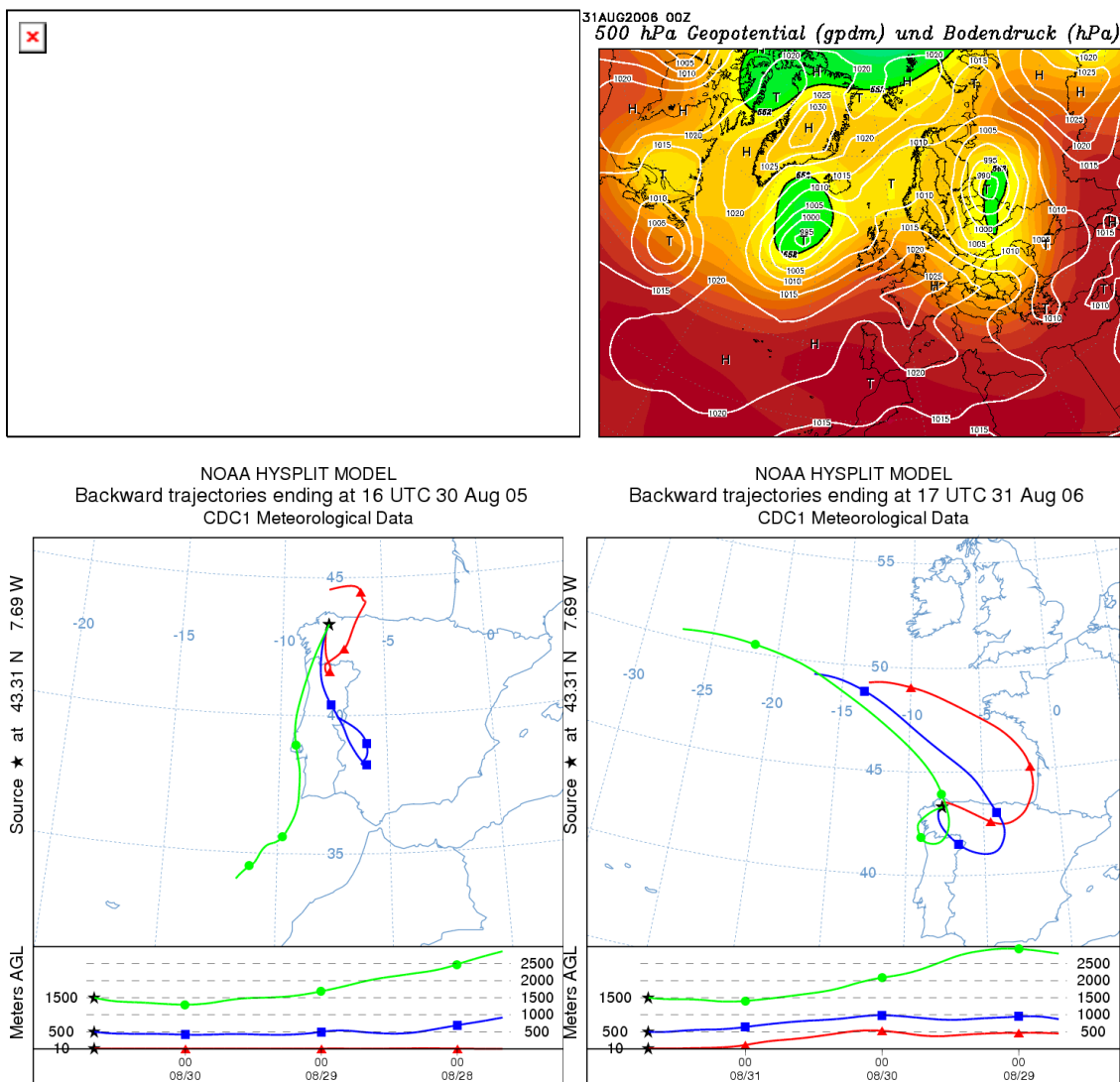


Figura 3.105: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) para las jornadas centrales de los episodios de carácter local nº 21 (29 Agosto - 04 Septiembre de 2005) y nº 27 (29 Agosto - 03 Septiembre de 2006), mostrando las configuraciones sinópticas de ‘Altas presiones en el Atlántico y Europa’ y ‘Vaguada ibero-africana’, respectivamente. La parte inferior muestra las trayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria de ozono en la estación C9-Mourence para los episodios anteriores, indicando la gran variedad de trayectorias que se pueden observar en los episodios de carácter autóctono”

El modelo de inmisión en estos episodios puede agruparse en dos tipos, considerando por un lado los episodios nº 28, nº 14, nº 10 y nº 12, que presentan persistencia nocturna de ozono y máximos relativos durante la noche, además de unos valores de inmisión de ozono sensiblemente superiores (máximos episódicos superiores a  $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a excepción del episodio nº 28), y los episodios nº 21 y nº 27, episodios sin persistencia nocturna, y con concentraciones máximas en torno a  $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Estos dos últimos episodios presentan un aumento brusco de los niveles de ozono, que descienden rápidamente al día siguiente, de modo que la duración del episodio sólo es de 24 horas, sin tiempo suficiente para la acumulación de ozono que permita alcanzar valores máximos superiores: el cambio de condiciones meteorológicas provocado por la entrada del anticiclón favorece la formación fotoquímica de ozono, puesta de manifiesto por el acusado ascenso térmico (superior a  $10\text{-}12^\circ\text{C}$  en algunas estaciones), pero que es frenada al día

siguiente por la pérdida de la influencia anticiclónica, reflejada de nuevo en otro intenso cambio de temperatura, que desciende otra vez una decena de grados.

Por otra parte, los episodios nº 14, nº 28, nº 10 y nº 12 presentan un comportamiento diferente, con mayor duración de la situación anticiclónica, marcada por la elevación gradual y mantenimiento posterior de los registros térmicos al menos durante 72 horas, lo cual amplía la extensión temporal del episodio, indicada por la acumulación y persistencia de los niveles de ozono. Tampoco puede descartarse en estos cuatro episodios una cierta influencia del transporte de ozono desde otras áreas, como el litoral cantábrico en el episodio nº 28, el oeste de Europa en el episodio nº 14 y, sobre todo, de Portugal en el episodio nº 10, dados los valores registrados en las estaciones limítrofes y las simulaciones de calidad de aire. De hecho, la situación meteorológica en la primera mitad de Agosto de 2003 (episodio nº 10), caracterizada por la larga duración de un área de altas presiones sobre el sudoeste de Europa, provocó un episodio europeo con altos niveles de ozono, que afectó sobre todo a Centroeuropa (Francia, Alemania, Suiza, norte de Italia, etc.), dada la posición del eje de la dorsal anticiclónica, y con menos intensidad, en España y Portugal (Fiala et al., 2003).

El carácter local de los cinco episodios queda reflejado por los niveles de NO<sub>x</sub> registrados, superiores al resto de episodios, sobre todo en los episodios nº 21, nº 27 y nº 28, así como por la existencia de importantes picos de SO<sub>2</sub>, procedente de la actividad industrial en el área de estudio, en los episodios nº 12, nº 27 y nº 28. Además, esta situación está relacionada con el registro de los máximos episódicos en estaciones semiurbanas, como B1-A Magdalena y C9-Mourence, más afectadas por la generación de precursores procedentes del tráfico, como ocurre en los episodios nº 10, nº 21, nº 27 y nº 28. El análisis de estaciones limítrofes no muestra registros significativamente superiores (salvo los registrados en el norte de Portugal en el episodio nº 10 y también en la estación de Lamas de Olo en los episodios nº 14 y nº 28), ni el modelo EURAD de calidad de aire indica en sus simulaciones altas concentraciones de ozono en el recorrido de las masas de aire simulado por el modelo HYSPLIT.

#### *Episodios de carácter alóctono*

Se consideran dentro de este tipo aquellos episodios que presentan una clara influencia de ozono troposférico transportado desde áreas más o menos alejadas del noroeste peninsular, a pesar de que la generación fotoquímica local siga siendo un factor importante a tener en cuenta para la explicación de los niveles de ozono registrados en dichos episodios.

##### *a) Episodios de origen portugués*

Los episodios cuyos niveles de inmisión de ozono presentan una importante influencia del transporte desde el sur de Galicia son el episodio nº 1 (14-23 de Julio de 2002), nº 11 (12-22 de Septiembre de 2003) y nº 19 (16-25 de Junio de 2005). Debe destacarse que el episodio nº 19 se ha considerado el principal episodio europeo de ozono en el verano de 2005, siendo Portugal uno de los países más afectados (European Environment Agency (EEA), 2005), ya que el 31% de sus estaciones de calidad de aire superaron los 180 µg/m<sup>3</sup>, el umbral de información a la población, mientras en España sólo fue superado por menos del 2% del total de estaciones.

Estos episodios se caracterizan por presentar una situación sinóptica de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa” (figura 3.106, arriba), con un centro de altas presiones situado al oeste de la Bretaña francesa, al norte del litoral cantábrico (episodio nº 19), o bien ligeramente desplazado hacia el norte, sobre las Islas Británicas (episodio nº 1) o Centroeuropa (episodio nº 11). Estas altas presiones están acompañadas por una baja relativa situada al oeste del golfo de Cádiz, que potencia el flujo sinóptico de componente S-SE sobre el noroeste peninsular. En altura destaca la importante dorsal africana, que se extiende hasta el norte de la península Ibérica, provocando un importante aumento térmico. Las trayectorias son un reflejo de la situación sinóptica, aunque varían en función del desplazamiento previo de los centros de altas presiones: en algún caso efectúan su recorrido completo de 72 horas por el litoral de Portugal (episodio nº 19), pero lo más frecuente (episodios nº 1 y nº 11) es que el aire proceda inicialmente del norte o nordeste peninsular, y que recorra parte de la Submeseta Norte, efectuando la última parte de su recorrido por el litoral portugués (figura 3.106, abajo). Esta situación dificulta la discriminación entre el posible origen portugués o mesetario del ozono, de

modo que se recurre a los modelos de calidad de aire para precisar en qué áreas los niveles de ozono son más elevados durante el recorrido de las masas de aire que alcanzan finalmente el norte de Galicia.

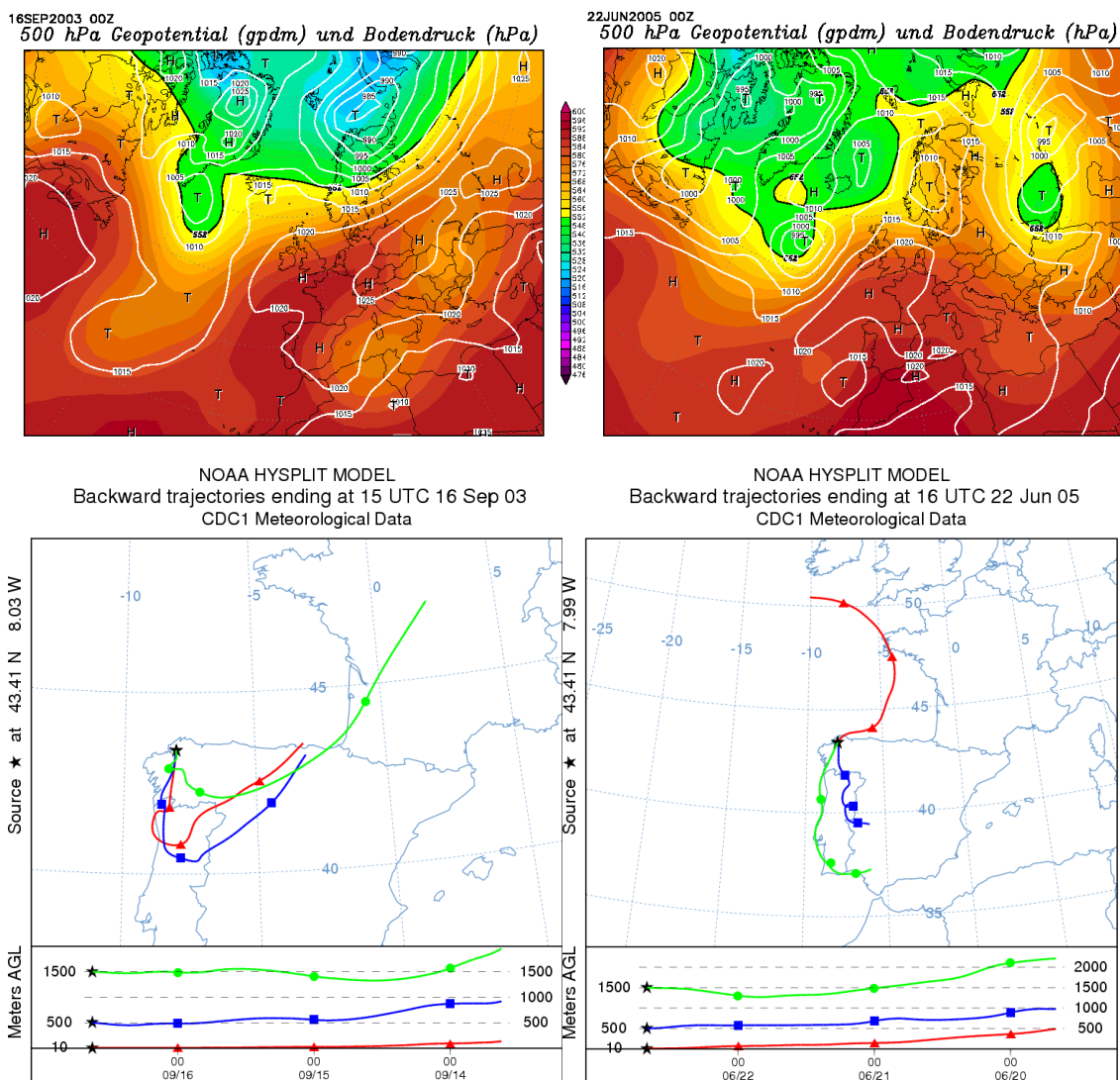


Figura 3.106: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) para las jornadas centrales de los episodios de carácter local nº 11 (12-22 Septiembre de 2003) y nº 19 (16-25 de Junio de 2005), mostrando la configuración sinóptica de ‘Altas presiones en el Atlántico y Europa’. La parte inferior muestra el recorrido realizado por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria de ozono para los episodios anteriores, indicando los dos tipos de trayectorias observados en los episodios de origen luso”

La meteorología local se caracteriza por las altas temperaturas que se registran, generalmente por encima de los 30 °C en la mayoría de estaciones, y por el establecimiento de regímenes locales de viento, al menos durante la jornada que registra el máximo. Estas brisas facilitan la entrada desde el mar de las masas de aire enriquecidas en ozono procedentes de Portugal y del litoral gallego, pues en estos tres episodios la influencia autóctona es también muy destacada. El viento a 80 m tiene una componente Sur más acusada que en otros episodios, soplando generalmente del SE-ESE en la estación D1-A Mourela, con una bajada apreciable de la intensidad de viento el día que registra el máximo. En altura, los radiosondeos lanzados en las ciudades de A Coruña y Santiago de Compostela indican dirección S-SO. La velocidad de viento es más elevada durante las jornadas previas a la aparición del máximo que durante dicha jornada, en la cual la intensidad se reduce apreciablemente.

A pesar del transporte alóctono procedente de Portugal, la influencia local también es importante, como pone de manifiesto la aparición de elevados niveles puntuales de  $\text{SO}_2$  en el durante la jornada que registra el máximo, lo cual es indicativo de la disponibilidad de otros precursores, como óxidos de nitrógeno, que suelen acompañar a este contaminante en el perfil de emisiones clásico de industrias de combustión. A su vez, estos importantes valores de  $\text{SO}_2$  reflejan la importante altura que alcanza la capa de mezcla durante estos episodios, al emitirse a grandes alturas, superiores a los 700 m en algunos casos, y sin embargo alcanzar la superficie en zonas próximas a su emisión. Por tanto, durante el día se presenta una capa de mezcla muy desarrollada, con una inversión térmica a gran altura, reforzada en ocasiones por una inversión de subsidencia, mientras por la noche se produce cierta inestabilidad en la capa atmosférica superficial, cuando comienza el enfriamiento nocturno, que conlleva en algunos casos pequeños aumentos de la inmisión de ozono nocturna.

El patrón de inmisión de ozono en estos episodios para los que se ha planteado el origen portugués es variable, aunque en general son episodios con bruscos aumentos de inmisión; además presentan niveles de ozono por encima de la media de los episodios analizados, con valores superiores en las estaciones rurales situadas más al oeste, de modo que F2-Fraga Redonda suele presentar una inmisión ligeramente superior a B2-Louseiras, menos afectada por el transporte litoral y las brisas costeras.

Las razones principales que justifican la influencia del transporte de ozono procedente de Portugal son los elevados niveles de ozono registrados en las estaciones del litoral portugués, el recorrido de masas de aire representado por las trayectorias y el análisis de las simulaciones de calidad de aire realizadas por el modelo EURAD.

Además de estos tres episodios que muestran una influencia clara del territorio luso, existe otro tipo de episodios que, aunque se han clasificado como autóctonos tras el análisis de las simulaciones de los modelos de calidad de aire (EURAD y Chimere), también presentan claras trazas de transporte de ozono procedente del país luso, como son los episodios nº 18 (22-28 de Mayo de 2005), nº 24 (3-10 de Junio de 2006) y nº 32 (01-06 de Agosto de 2007).

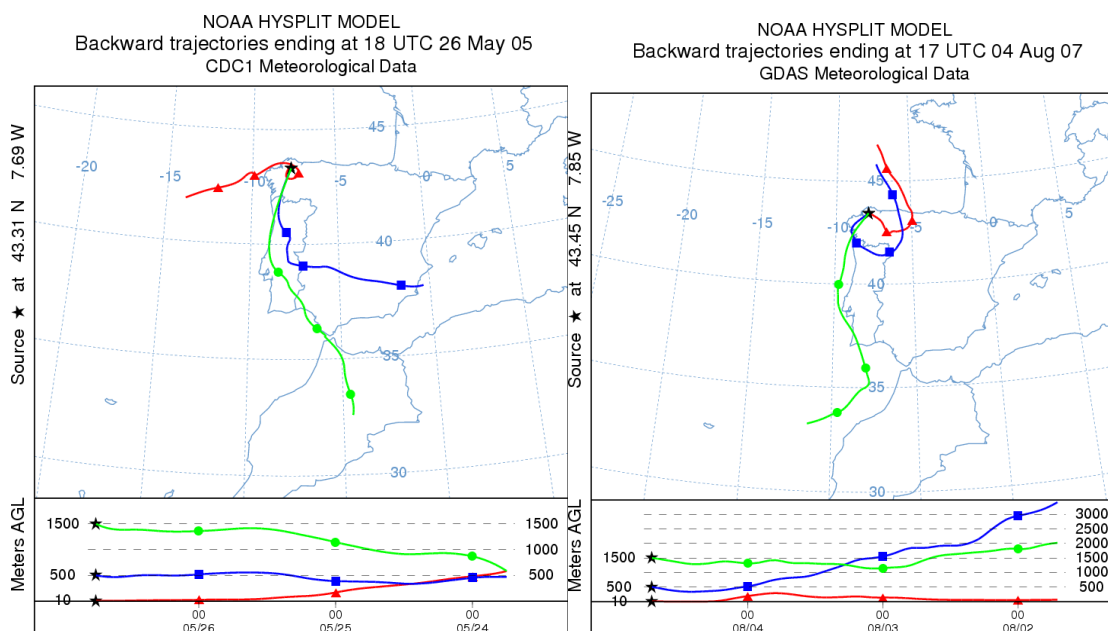


Figura 3.107: “Trayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria de ozono para los episodios de origen luso nº 18 (22-28 Mayo de 2005) y nº 32 (01-06 Agosto de 2007), mostrando el recorrido de las masas de aire por el litoral portugués”

La configuración sinóptica dominante durante estos tres episodios es similar a la descrita para los tres episodios anteriores, una vez más con la situación de “Altas presiones sobre el

Atlántico y Europa”, y repitiéndose de nuevo la posición del anticiclón sobre las Islas Británicas (episodio nº 24) o Centroeuropa (episodios nº 18 y nº 32), así como las bajas presiones relativas al suroeste de Portugal. Sin embargo, las retrotrayectorias son ligeramente diferentes (figura 3.107): en estos tres casos parten del noroeste de África, entrando por el sur de España y recorriendo todo Portugal, por el litoral (episodios nº 18 y nº 32) o por el interior (episodio nº 24), con lo cual efectúan un mayor recorrido y se pierde la posible influencia de la meseta, posiblemente presente en alguno de los episodios considerados de origen portugués. Esta alteración de la trayectoria se debe, al menos en los episodios nº 18 y nº 24, a la mayor estabilidad y permanencia del anticiclón de bloqueo situado sobre las Islas Británicas o Europa Central, que no se desplaza como en los otros episodios previamente mencionados, manteniendo un flujo constante de componente Sur, al menos en altura.

Las características meteorológicas son claramente favorables para la generación fotoquímica local, al igual que en los episodios previos, pues la meteorología local de estos tres episodios es muy similar a la que presentan los episodios anteriores de origen luso, dada la similitud de las condiciones sinópticas entre todos: altas temperaturas, superiores a 30 °C e incluso a 35 °C (episodio nº 32), vientos flojos que disminuyen su intensidad en la jornada con mayores niveles de ozono y frecuente aparición de brisas marinas en las estaciones costeras.

Salvo el episodio nº 32, claramente puntual, los otros dos episodios (nº 18 y nº 24) presentan mayores niveles de persistencia del ozono en los días previos al máximo, lo cual puede ser indicativo de un estancamiento o transporte previo de ozono, dada la estabilidad dominante durante estos episodios, a causa de la permanencia del anticiclón de bloqueo sobre las Islas Británicas.

La inmisión de ozono registrada en el norte de Portugal alcanza niveles muy elevados en las estaciones de Lamas de Olo y Senhora de Minho, siempre por encima de los registrados en Galicia, mientras que la estación de O Saviñao, en el sur de Lugo, muestra niveles inferiores a las estaciones septentrionales cuando la trayectoria es costera (episodios nº 18 y nº 32) y mayores cuando la trayectoria es interior (episodio nº 24). Según datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente (European Environment Agency, 2005, 2006 y 2007), todos estos episodios registraron altos niveles de ozono en Portugal:

- durante el episodio nº 32, entre el 7% y el 20% de las estaciones portuguesas registraron superaciones horarias de los 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (umbral de información a la población) el día 3, sobrepasando el 20% de las estaciones la jornada siguiente, día 4, mientras en España el porcentaje de estaciones que registraron niveles por encima de ese umbral no llegó al 2% ninguno de los dos días, al igual que la media de las estaciones europeas
- durante el episodio nº 24, entre el 7% y el 20% de estaciones portuguesas superaron el umbral de información a la población los días 5 y 6 de Junio, disminuyendo hasta menos del 2% el día 7, que registra el máximo episódico en Galicia; en España, menos del 2% el día 6 y entre el 2% y el 7% el día 7
- el episodio nº 18 fue el tercer mayor episodio de ozono registrado en la Unión Europea durante el verano (Abril-Septiembre) de 2005, aunque éste tuvo más repercusión en España, Francia, Italia, etc. que en Portugal, donde menos del 2% superaron el umbral de información el día central del episodio, a diferencia de España, con un porcentaje de estaciones con superaciones del umbral entre el 2% y el 7%

A pesar de algunos indicios, realizar una distinción clara entre episodios locales con influencia de Portugal y episodios dominados por el transporte de ozono procedente de Portugal es una tarea realmente difícil con los datos disponibles; una solución más definitiva para esta discriminación, y en general para el resto de episodios, sería el uso de modelos de calidad de aire para establecer simulaciones con diferentes escenarios de emisión (eliminación de emisiones en Portugal, eliminación de emisiones en Galicia, etc.).

La principal conclusión que se puede extraer del análisis de estos episodios que presentan un grado apreciable de transporte de ozono desde el sur de Galicia y Portugal está relacionada con la situación sinóptica: la presencia de un centro de altas presiones al norte de la península

Ibérica, en una posición entre las Islas Británicas y Centroeuropa, combinado con un área de bajas presiones relativas al suroeste de Portugal, provoca una meteorología favorable a la generación fotoquímica de ozono en todo el tercio oeste peninsular, a la que se suma el transporte en dirección norte del ozono previamente formado, provocando una importante elevación de los niveles de inmisión de ozono en el norte de Galicia

#### b) Episodios de origen cantábrico

El episodio nº 20 (09-15 de Julio de 2005) muestra elevados niveles de inmisión de ozono causados fundamentalmente por el transporte a lo largo de la costa cantábrica y el norte de la meseta castellana, mientras los episodios nº 23 (04-11 de Octubre de 2005), nº 29 (16-25 de Abril de 2007) y nº 13 (31 de Mayo-11 de Junio de 2004), considerados de carácter local, presentan un importante aporte de ozono autóctono también procedente del litoral norte peninsular. El episodio nº 20 es el segundo episodio de ozono en importancia durante el verano de 2005 en Europa (European Environment Agency, 2005), siendo los países mediterráneos (España, Portugal, Grecia e Italia) los países más afectados durante este período.

Este episodio nº 20, con origen cantábrico muestra una configuración sinóptica del tipo “Vaguada ibero-africana” (figura 3.85), caracterizada por la amplia extensión del anticiclón, desde las Azores hasta Centroeuropa, y la presencia de una vaguada en el mapa de superficie, que se extiende desde el norte de África hasta las costas del norte peninsular. En altura, las altas presiones atlánticas, que alcanzan la costa occidental de Europa, sólo se ven interrumpidas por un débil centro de bajas presiones enfrente del litoral portugués, cuyo reflejo en superficie es la ya citada vaguada. Esta situación anticiclónica se prolongó durante varias jornadas, partiendo del clásico y potente anticiclón centrado sobre las Islas Británicas, que provoca un importante ascenso térmico y establece un flujo sinóptico de componente Este sobre el litoral cantábrico: la retrotrayectoria modelizada para este episodio (figura 3.84) parte de Europa Central (oeste de Alemania), atraviesa Francia, y entra en la península por el golfo de Vizcaya, para penetrar posteriormente en el norte de la Submeseta Norte y alcanzar Galicia en dirección sudeste. Una configuración sinóptica muy similar, aunque con el anticiclón de bloqueo situado más al sur (al suroeste de las Islas Británicas, y no sobre ellas), es la que presenta el episodio nº 13, de carácter autóctono pero con clara influencia cantábrica; por tanto, la trayectoria es prácticamente igual a la descrita para el episodio anterior, aunque en este caso parte del sur de Inglaterra, debido al citado desplazamiento al oeste del centro de altas presiones. Los episodios nº 23 y nº 29 son ligeramente distintos, con una configuración sinóptica caracterizada por una menor influencia anticiclónica (“Anticiclón Británico-Escandinavo” -figura 3.96- y “Depresión del golfo de Cádiz”, respectivamente), con el centro de altas presiones desplazándose hacia el centro - norte de Europa desde las Islas Británicas, lo cual establece un gradiente de presión mucho más débil, que se representa en las retrotrayectorias asociadas con un menor recorrido de las masas de aire: como ejemplo, en el episodio nº 23, recorren el golfo de Vizcaya hasta entrar en el noroeste peninsular, con 24-36 horas de recirculación sobre Galicia (figura 3.97), aumentando la influencia de la generación local en este episodio.

Debe mencionarse que, aunque las diferencias de las condiciones sinópticas entre los episodios de carácter cantábico-atlántico y los episodios con origen portugués no son muy marcadas, sí destaca el hecho de que los episodios cantábricos presentan un centro de altas presiones más desplazado hacia el norte - noroeste de la península Ibérica: en los episodios portugueses este centro anticiclónico se situaba prácticamente sobre el Cantábrico, favoreciendo una mayor penetración de las masas de aire por el interior peninsular hasta su llegada a Galicia, mientras que en el caso cantábrico las trayectorias son más paralelas al litoral norte.

La meteorología local refleja las condiciones sinópticas mencionadas, con temperaturas altas que se incrementan progresivamente (por encima de los 30 °C en las estaciones situadas más al oeste, como F2-Fraga Redonda, y sensiblemente inferiores en estaciones más afectadas por el noreste, como B2-Louseiras) y vientos sostenidos de componente Este, con una mayor componente Norte en las estaciones más septentrionales, como B2-Louseiras, y sin establecimiento de regímenes locales de viento, salvo a lo sumo el día en que se alcanza el registro máximo de ozono. La intensidad de viento sinóptico es ligeramente superior a la



registrada en la mayoría de episodios, salvo en el episodio nº 23, lo cual contribuye a que no se desarrollen las brisas y otros vientos locales.

A diferencia de los episodios con origen portugués, este tipo de episodios muestran un carácter claramente progresivo, aumentando los niveles de ozono a medida que la influencia anticiclónica se hace más patente, favoreciendo la llegada progresiva de ozono desde zonas más orientales, como el continente europeo, y no desde el océano Atlántico, como ocurre en los primeros días del episodio, en los que el noroeste peninsular está afectada por un transporte más septentrional. En este caso, la estación rural más afectada es B2-Louseiras, registrando una inmisión superior a F2-Fraga Redonda, situada más al oeste, y menos afectada por el transporte desde el este, al estar en una cota inferior y en una zona más protegida debido a su orografía. La persistencia de ozono durante la noche es mucho más patente en las estaciones norteñas, como B2-Louseiras y G2-Vilanova, y mayor en los episodios nº 23, nº 20 y nº 29, cuya influencia del transporte alóctono es más apreciable frente al episodio nº 13, en el cual la generación fotoquímica local es más relevante, como indican los mayores niveles registrados de precursores nitrogenados y de SO<sub>2</sub>, y el registro del máximo episódico en estaciones afectadas por el tráfico, como B1-A Magdalena y C9-Mourence. Del mismo modo, los registros máximos de ozono son notablemente superiores en el episodio nº 20 (todas las estaciones del norte de A Coruña con máximos por encima de 160 µg/m<sup>3</sup>, según se observa en la figura 3.81), más afectado por el transporte alóctono, que en el episodio nº 13, en el cual sólo las estaciones, B1-A Magdalena y C9-Mourence, superan los 140 µg/m<sup>3</sup>, y el episodio nº 23, con sólo la estación B2-Louseiras por encima de 160 µg/m<sup>3</sup> (figura 3.98).

La hipótesis del transporte de ozono procedente del tercio norte peninsular se basa en los niveles registrados en las estaciones cantábricas, como la estación EMEP de Niembro, que suele presentar en el resto de episodios valores sensiblemente inferiores a los medidos en las estaciones del norte de Galicia, en la escasa concentración de óxidos de nitrógeno en estas estaciones, y en las trayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro del máximo episódico, así como en los análisis de las simulaciones de calidad de aire proporcionadas por los modelos EURAD y Chimere.

#### c) Episodios de origen mesetario

Los episodios con elevadas concentraciones de inmisión de ozono troposférico probablemente achacables al transporte procedente del centro y este peninsular y, sobre todo, de la Submeseta Norte castellana, son el episodio nº 15 (28 Julio-05 Agosto de 2004) y el nº 26 (13-26 de Julio de 2006). Ambos episodios coinciden con los episodios europeos con mayores niveles de ozono en sus respectivos años:

- el episodio nº 15, en Agosto de 2004, coincide con el principal episodio de ozono a nivel europeo durante el verano de 2004, pues en ese período se registraron más del 38% del total de superaciones estivales del umbral de información a la población (European Environment Agency, 2005).
- el episodio nº 26, en Julio de 2006, también forma parte del período con mayor inmisión de ozono en el continente europeo durante el verano de 2006 (17-28 de Julio de 2006); en concreto, durante el día 17 de Julio, países como Francia, Bélgica, Reino Unido, Portugal (todos ellos con entre el 7% y el 20% de estaciones por encima del umbral de información a la población) y España (entre el 2% y el 7% de estaciones que sobrepasaron dicho umbral) registraron un elevado porcentaje de estaciones con niveles por encima del umbral de 180 µg/m<sup>3</sup> (European Environment Agency, 2007).

Otros episodios, como los episodios nº 8 (18-24 de Junio de 2003), nº 7 (26 Mayo-01 Junio de 2003), nº 3 (23 Agosto-04 Septiembre de 2002) y nº 25 (30 Junio-11 Julio de 2006) han sido clasificados como locales, pero con una importante aportación de ozono procedente del interior de la península Ibérica. Estos cuatro episodios también tienen correspondencia con episodios europeos, aunque no tan intensos como los citados previamente.

La situación sinóptica de los episodios considerados de carácter mesetario (figura 3.108, arriba) se caracteriza claramente por un gradiente bórico muy poco marcado, originado por un pantano barométrico durante el episodio nº 15, y por una configuración de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa” en el episodio nº 26, que al no tener un centro anticiclónico bien definido, establece un débil flujo sinóptico sobre la península Ibérica, dominado por el establecimiento de una baja térmica en el centro peninsular. En altura es claramente perceptible, una vez más, la dorsal africana, que incluso alcanza latitudes por encima de los Pirineos. Esta débil diferencia de presión dificulta el movimiento del aire en las capas bajas de la atmósfera, de modo que las masas aéreas efectúan cortos recorridos en las 72 horas consideradas para las trayectorias (figura 3.108, abajo), claramente coincidentes en ambos episodios: a 1500 m de altura, el aire se mantiene estancado sobre el centro-oeste peninsular, para alcanzar el litoral noroeste en dirección SE, mientras a 500 m las masas de aire alcanzan Galicia tras permanecer al menos 48 horas sobre el norte de la Submeseta Norte (provincias de León, Valladolid, Burgos, ...).

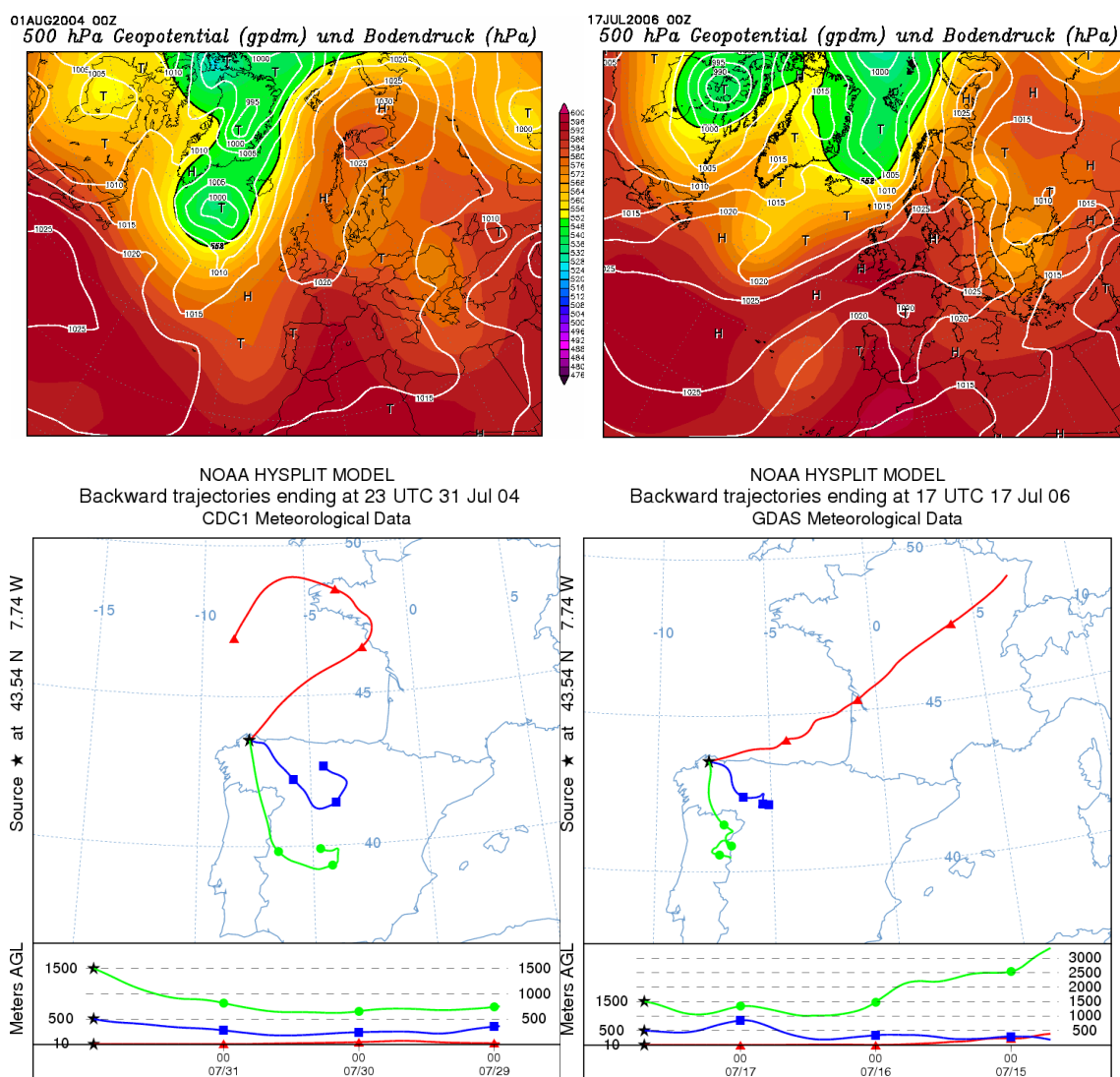


Figura 3.108: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) para las jornadas centrales de los episodios de carácter mesetario nº 15 (28 Julio-05 Agosto de 2004) y nº 26 (13-26 de Julio de 2006), mostrando las configuraciones sinópticas de ‘Pantano barométrico’ y ‘Altas presiones en el Atlántico y Europa’, respectivamente. La parte inferior muestra el recorrido seguido por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria de ozono para los episodios anteriores, indicando las trayectorias observadas en los episodios de origen mesetario”

Los registros meteorológicos locales coinciden con los esperados bajo las condiciones anticiclónicas dominantes, destacando el ascenso progresivo de las temperaturas, que superan en algunas estaciones los 35 °C, y la baja intensidad de viento, menor que en el resto de episodios cuya causa principal es el transporte alóctono de ozono. Un ejemplo significativo es el episodio nº 15, en el cual la velocidad de viento a 80 m registrada en la estación D1-A Mourela no supera los 5 m/s durante todo el período episódico previo al registro del nivel máximo de ozono. La dirección de viento a 80 m está dominada por la componente E, aunque con frecuentes rolamientos al SE, y el establecimiento de fenómenos locales como brisas marinas. Los radiosondeos sobre las ciudades de A Coruña y Santiago de Compostela también registran una dirección preferente E-SE en los primeros 1500 – 2000 m de la atmósfera, con velocidades bajas. Una vez más, las condiciones meteorológicas locales son favorables para la generación fotoquímica local de ozono, lo cual hace muy difícil separar las contribuciones del ozono transportado y del ozono formado localmente para establecer el origen de los episodios.

No obstante, ambos episodios presentan carácter progresivo, con persistencia del ozono durante la noche (al menos en el episodio nº 26) e intensos repuntes nocturnos de ozono, lo cual indica una acumulación de ozono en las capas altas de la atmósfera. Del mismo modo, la concentración de precursores nitrogenados es muy baja en las estaciones rurales, como B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, lo cual apunta hacia fenómenos de transporte de ozono, apoyando la hipótesis de aporte de ozono envejecido, aunque su origen pueda ser una mezcla de ozono formado localmente (más probable en el caso del episodio nº 15) y ozono procedente del este peninsular. Como en el caso de los episodios de origen cantábrico, la inmisión de ozono registrada en la estación B2-Louseiras, más oriental y expuesta al transporte desde el este, es notablemente superior a la inmisión medida en F2-Fraga Redonda, registrándose valores muy próximos al nivel de información a la población, 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Los datos que apoyan el origen mesetario de estos episodios se basan en el recorrido efectuado por las trayectorias y en el análisis de las simulaciones de calidad de aire del modelo EURAD, pues apenas existen medidas de ozono representativas en estaciones castellanas próximas a Galicia. Aún así, los datos de las estaciones EMEP de Peñausende, en Zamora, y O Saviñao, en el sur de Lugo, parecen confirmar parcialmente esta hipótesis, al recoger concentraciones persistentes de ozono próximas a los máximos registrados en las estaciones coruñesas.

La influencia del transporte desde el interior peninsular también se ha considerado importante en otros cuatro episodios, los episodios nº 8, nº 7, nº 3 y nº 25, cuya principal causa es la generación local de ozono, según el análisis de las simulaciones de calidad de aire del modelo EURAD. Dos de ellos, los episodios nº 3 y nº 25, no tienen una gran relevancia dentro del conjunto de episodios analizados, pues sus niveles de inmisión no son demasiado altos, además de presentar grandes discrepancias entre la estación que registra el máximo episódico y el resto de estaciones próximas. Por el contrario, el episodio nº 8 es el episodio que presenta la mayor concentración de ozono horario en todo el período analizado, con 210  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y presenta unas características muy similares al episodio nº 7, aunque los registros de ozono en éste son mucho menos relevantes.

Estos dos últimos episodios de carácter autóctono (nº 8 y nº 7) presentan la clásica situación sinóptica (figura 3.109, arriba) relacionada con altos niveles de inmisión de ozono en el norte peninsular provocada por transporte regional (Gangoiti et al., 2002 y 2006): el anticiclón de las Azores que desplaza progresivamente su centro hacia el nordeste, situándose sobre el Cantábrico, entre el litoral peninsular y las Islas Británicas, hasta constituir el característico “anticiclón de bloqueo” incluido en el tipo sinóptico de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, frecuente a finales de la primavera. Las retrotrayectorias asociadas a esta situación sinóptica presentan algunas variaciones, pero siempre dentro de un mismo patrón general: recorrido semicircular por la mitad norte peninsular, entrando por los Pirineos y bajando hasta el interior peninsular en dirección NE, hasta cambiar a dirección SE para iniciar el ascenso hasta la esquina noroeste (figura 3.109, abajo). Este recorrido pasa sobre la vertical de zonas con una elevada tasas de inmisión de precursores nitrogenados de ozono, como los cinturones urbano-industriales de Barcelona y Madrid, y las áreas industriales del País Vasco. En el caso de los otros dos episodios de carácter autóctono (nº 3 y nº 25), la situación sinóptica vuelve a ser muy parecida a los episodios nº 15 y nº 26, de origen mesetario, con un débil forzamiento

sinóptico en todos ellos, considerada como “pantano barométrico”. Se mantiene en ambos un gradiente de presión muy poco marcado sobre la península Ibérica, con centros de altas presiones situados al nordeste peninsular, siempre desplazados hacia Europa Central o la península Escandinava. De igual modo, las retrotrayectorias también son muy semejantes en el caso de los episodios nº 3 y nº 25, con trayectorias a 1500 m de altura penetrando en Galicia en dirección SE desde el centro-sur peninsular, mientras a 500 m las masas de aire tienen un origen más septentrional, procediendo del límite superior de la Submeseta Norte.

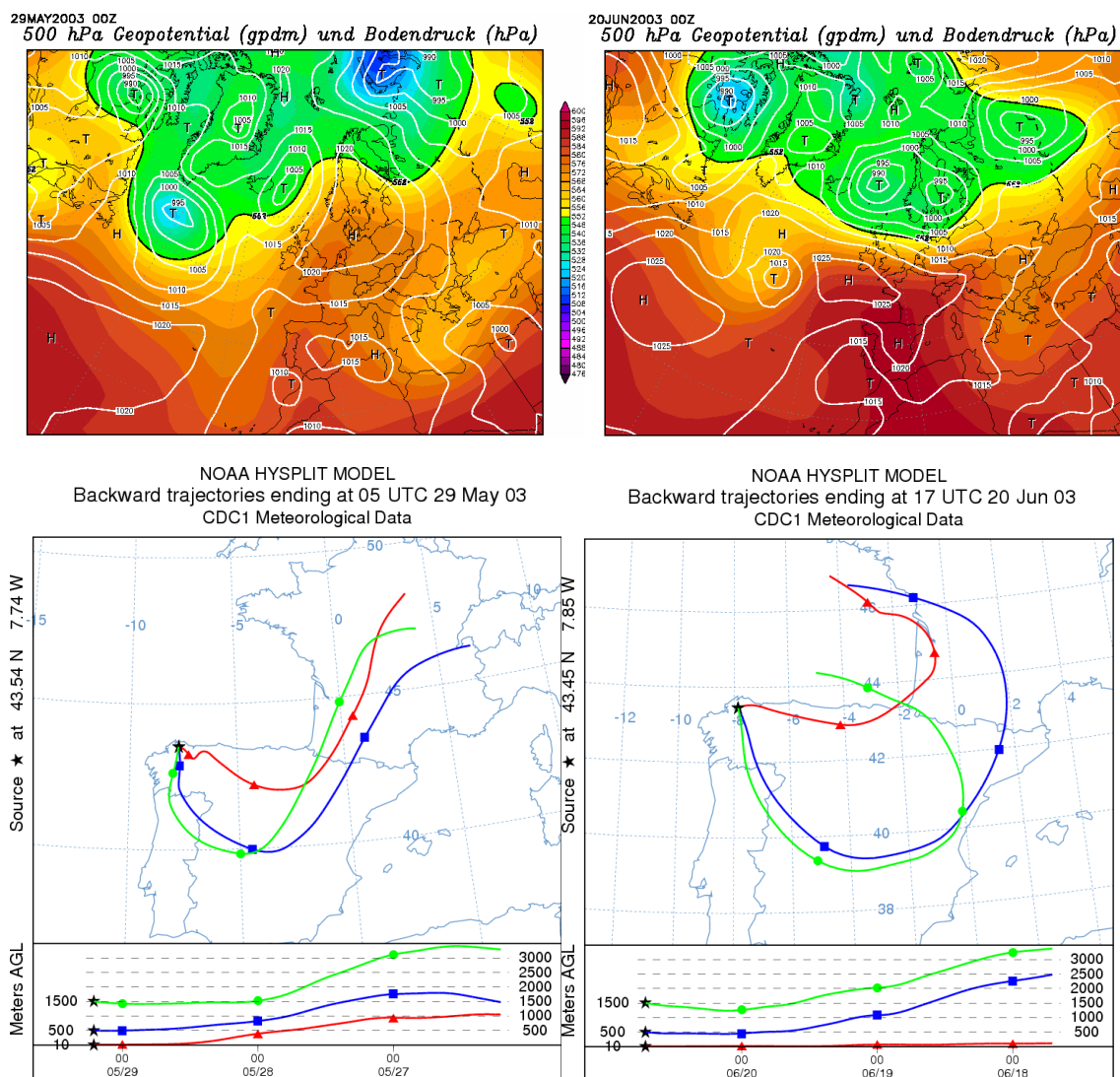


Figura 3.109: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) para las jornadas centrales de los episodios de carácter local con influencia de transporte desde la Meseta: episodios nº 07 (26 Mayo-01 Junio de 2003) y nº 08 (18-24 de Junio de 2003), mostrando la configuración sinóptica de ‘Altas presiones en el Atlántico y Europa’, más potente y con el centro anticiclónico situado más al Sur en el episodio nº 8, lo cual tiene un reflejo claro en la inmisión de ozono, muy superior en el episodio nº 8. La parte inferior muestra las trayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria de ozono para los episodios anteriores, indicando las trayectorias observadas en los episodios de origen mesetario”

La meteorología local se caracteriza una vez más por las altas temperaturas, de 25 °C a 30 °C en las estaciones del norte de A Coruña, aunque sin alcanzar valores tan elevados como en los episodios precedentes, salvo en el caso del episodio nº 8 (registros superiores a 35 °C en alguna estación) y por las bajas velocidades de viento, que se mantiene de componente Este en los cuatro episodios.

La concentración horaria de ozono troposférico en el episodio nº 8 es muy elevada, ya que supera los 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y pertenece al grupo de los episodios de carácter puntual. Los niveles de inmisión alcanzados en los episodios nº 7, nº 3 y nº 25 son muy inferiores a las concentraciones de ozono superficial registradas en los episodios nº 15 y nº 26, causados por transporte desde la Meseta, sin alcanzar el umbral de los 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y con concentraciones de inmisión mayores en la estación F2-Fraga Redonda que en la estación B2-Louseiras. Estos episodios tampoco presentan persistencia ni máximos relativos nocturnos, salvo el episodio nº 7, y tienen carácter puntual, en el caso del episodio nº 3, y progresivo de carácter intermedio, en los episodios nº 7 y nº 25. La mayor influencia local se observa en los niveles superiores de óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$  medidos durante la evolución del episodio, en el incremento de la frecuencia e intensidad de los picos de dióxido de azufre  $\text{SO}_2$ , y en la existencia de una gran disparidad de inmisión de ozono entre estaciones próximas en los episodios nº 3 y nº 25. La importante diferencia de inmisión entre los episodios nº 7 y nº 8, con semejantes configuraciones sinópticas y retrotrayectorias, podría radicar en una menor aportación de la generación local en el episodio nº 7, debido a las condiciones meteorológicas menos favorables (sobre todo la temperatura, sensiblemente inferior), causadas por una menor extensión de la estabilidad anticiclónica, y una situación más meridional del centro de altas presiones, situado sobre el mar Cantábrico.

En resumen, los episodios afectados por transporte de ozono troposférico desde el interior peninsular suelen presentar configuraciones sinópticas débiles, bien en forma de pantano barométrico o bien con el anticiclón de las Azores muy desplazado hacia el norte, hasta situar el centro de altas presiones sobre Escandinavia, y afectan con mayor intensidad a las estaciones orientales gallegas. Sin embargo, otra clase de episodios de tipo peninsular se caracterizan por la proximidad del anticiclón de bloqueo al litoral cantábrico, causando una recirculación de las masas de aire sobre la mitad norte peninsular, a medida que el centro de altas presiones se desplaza hacia el Este, internándose en Europa Central. La contribución de la generación local de ozono tiene gran importancia en estos episodios, en unos casos debido a la débil intensidad de viento registrada, que dificulta el transporte de masas de aire enriquecidas en ozono, mientras en otros episodios obedece a la importante estabilidad provocada por las condiciones sinópticas, que favorece el confinamiento de los contaminantes emitidos en el área de estudio.

### *3.6.3 Descripción de episodios representativos*

Se presenta a continuación el análisis de un episodio representativo de cada uno de los cuatro orígenes establecidos.

#### *Origen local*

El episodio nº 10 (30 Julio-16 Agosto de 2003) se ha considerado de origen local, causado por la generación fotoquímica de ozono a partir de precursores emitidos en el área de estudio o su entorno próximo.

A nivel europeo, las primeras dos semanas del mes de Agosto de 2003 constituyeron el principal episodio de ozono troposférico del año 2003, destacando su larga duración y las elevadas concentraciones de inmisión de ozono registradas, afectando a todos los países europeos salvo los nórdicos (Fiala et al., 2003). Las condiciones sinópticas se caracterizaron por las temperaturas registradas en el sur, oeste y centro de Europa, excepcionalmente elevadas incluso durante la noche, debido a un área de altas presiones situada sobre el suroeste europeo (figura 3.110), situándose el eje de la dorsal sobre Francia, Alemania occidental, Suiza y el norte de Italia. Estas condiciones no difieren de las registradas en el noroeste peninsular, con temperaturas muy elevadas e intensidades de viento flojas, lo cual favorece la generación fotoquímica y la recirculación de masas de aire debido a los vientos locales (figura 3.111).

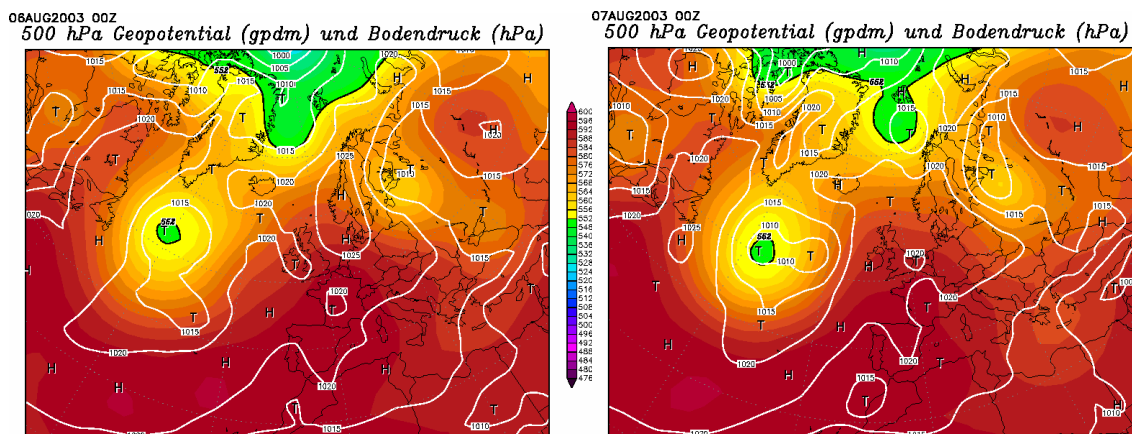


Figura 3.110: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) mostrando los campos de presión superficial y altura del geopotencial a 500 hPa para los días 6 y 7 de Agosto de 2003, jornadas centrales del episodio nº 10 (30 Julio -16 Agosto de 2003), que ponen de manifiesto la presencia de un intenso cinturón de altas presiones desde las Azores hasta Europa Central”

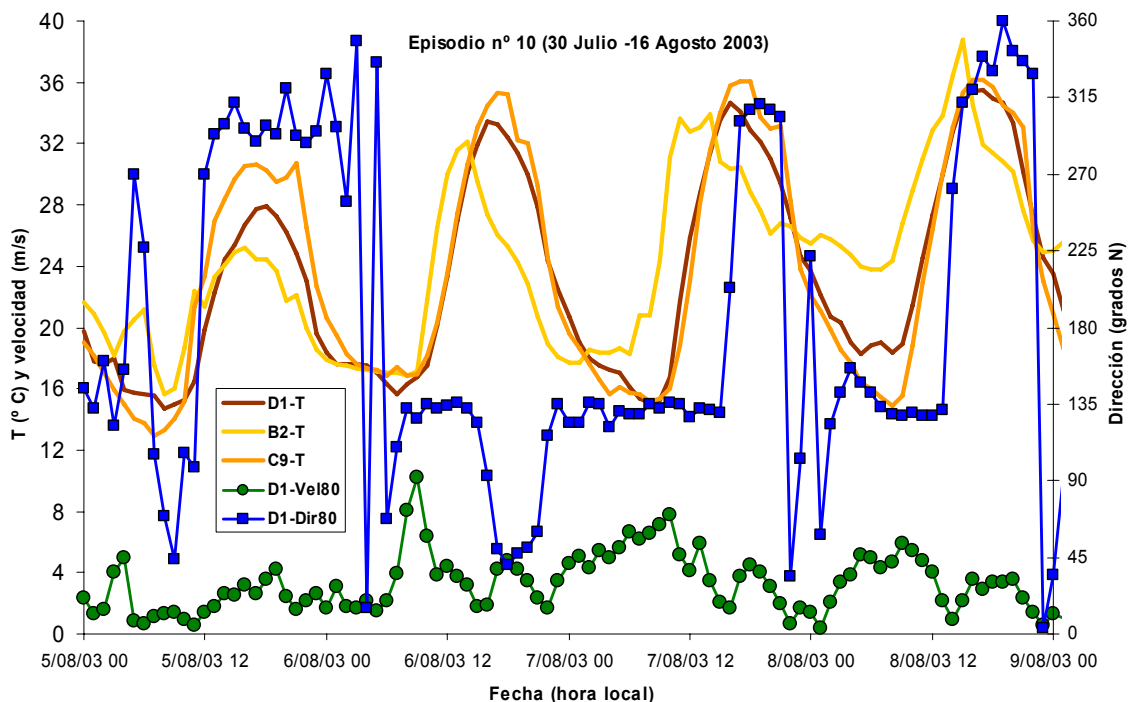


Figura 3.111: “Series temporales de temperatura superficial (2 m) para las estaciones D1-A Mourela, B2-Louseiras y C9-Mourence, velocidad y dirección de viento a 80 m en la estación D1-A Mourela, para las cuatro jornadas centrales del episodios nº 10 (30 Julio - 16 Agosto de 2003). Destaca la elevada magnitud de las máximas (por encima de 35 °C en alguna estación) y de las mínimas, así como el flujo sinóptico del SE, aunque con débiles intensidades de viento”

Esta situación de altas presiones favorece el estancamiento de las masas de aire, lo cual se asocia con la persistencia de las elevadas concentraciones de ozono superficiales: las concentraciones de ozono horario superaron los  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en un gran número de estaciones de Bélgica, el norte de Francia y el noroeste de Alemania, e incluso los  $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una estación francesa, siendo las áreas más afectadas aquellas que presentaban una mayor densidad de emisiones de precursores fotoquímicos del ozono, causadas por el tráfico o la producción industrial (figura 3.112).



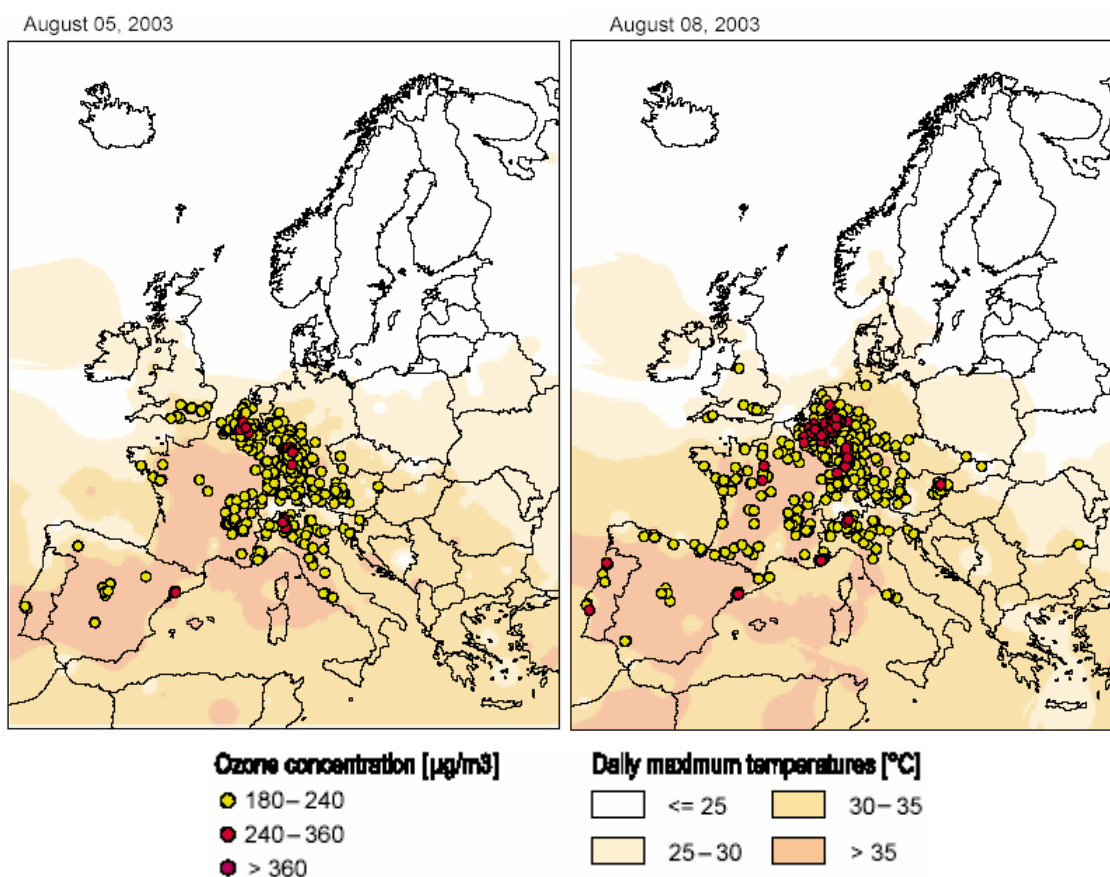


Figura 3.112: “Estaciones europeas de calidad de aire (rurales, suburbanas y urbanas) que superaron el umbral horario de información a la población establecido por la Directiva 2008/50/EC ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante los días 5 y 8 de Agosto de 2003 (episodio n° 10) y valores de temperatura asociados a las jornadas anteriores. Fuente: Fiala et al., 2003”

Los registros de ozono en el noroeste de la península Ibérica no alcanzan concentraciones tan elevadas, como se puede observar en la figura 3.113, ya que los registros horarios más altos son los correspondientes a la estación zamorana de Peñausende, que roza los  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del umbral de información a la población, pero sin llegar a superarlos. Las estaciones gallegas presentan valores ligeramente inferiores, pero se observa un aumento progresivo hasta alcanzar la máxima concentración de ozono superficial la tarde del día 7 en la estación suburbana C9-Mourence, con  $174 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en la que se observa un perfil de ozono claramente dependiente de generación fotoquímica por consumo de  $\text{NO}_2$ . Destaca también la persistencia de la inmisión de ozono durante la madrugada del día 8 de Agosto en las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, que superan el umbral octohorario de protección a las salud humana ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Este comportamiento nocturno parece claramente relacionado con la evolución de la serie térmica nocturna, que se caracteriza por el elevado registro de las mínimas y su mantenimiento durante la noche (figura 3.111), reflejando una posible disminución de la estabilidad nocturna. Por otra parte, uno de los indicios que apuntan a un aumento de la generación local de ozono en el norte de Galicia es el incremento gradual de precursores nitrogenados en las estaciones rurales, acompañado del progresivo aumento de los niveles máximo de ozono (figura 3.114), así como la existencia de elevados niveles de dióxido de azufre  $\text{SO}_2$  durante el período central del episodio, utilizado como trazador al ser un contaminante primario.



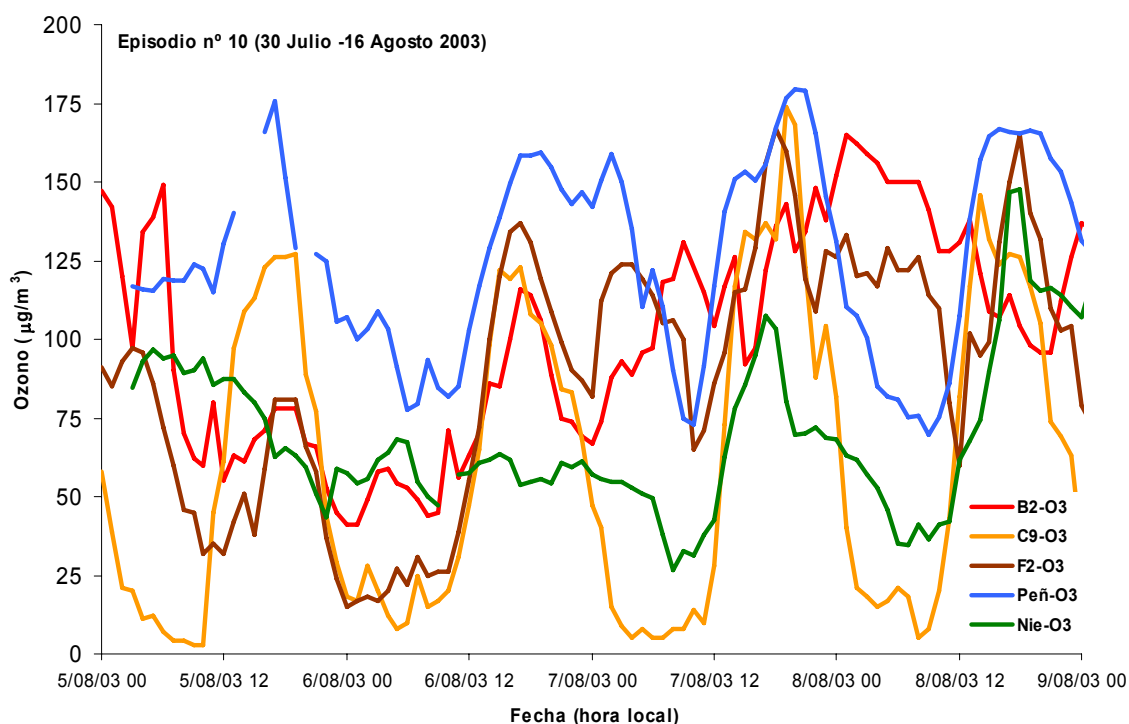


Figura 3.113: “Series temporales de concentración superficial de ozono en las estaciones gallegas B2-Louseiras, C9-Mourence, F2-Fraga Redonda, la estación asturiana de Niembro y la zamorana de Peñausende para los cuatro días centrales del episodio nº 10 (30 Julio -16 Agosto 2003). Destacan las concentraciones registradas en Peñausende, rozando los  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y los bajos registros en el oriente asturiano, mientras las estaciones gallegas experimentan un repunte común el día 7, con posterior persistencia nocturna en las estaciones B2 y F2”

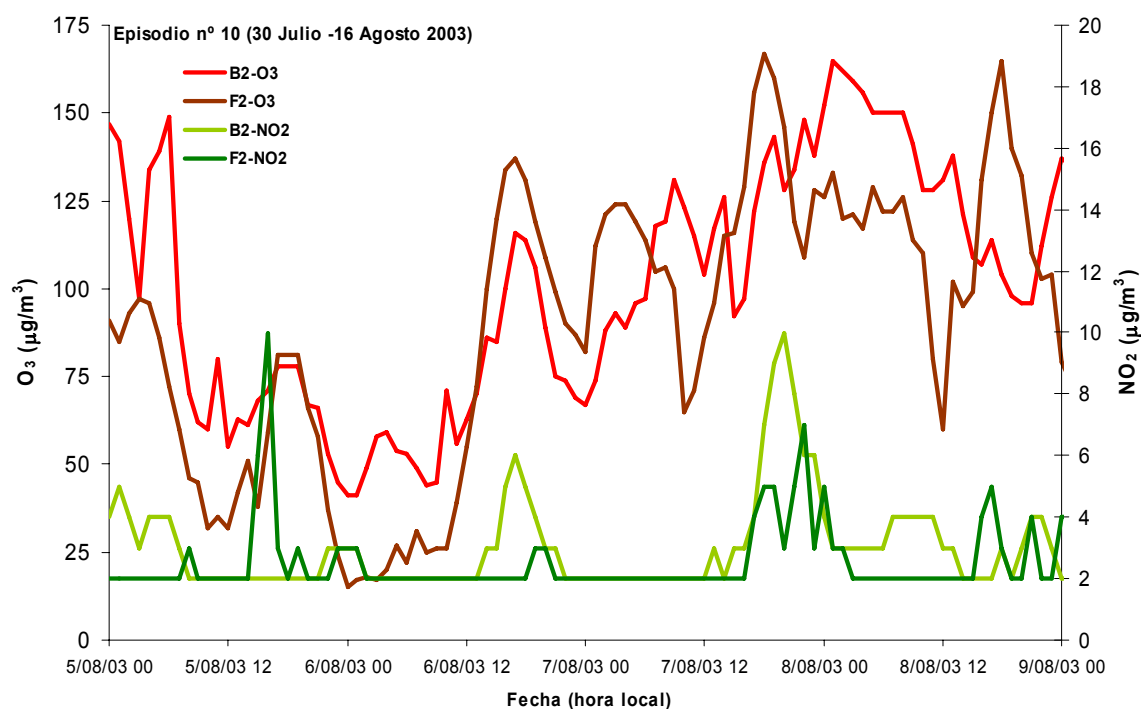


Figura 3.114: “Series temporales de concentración superficial de ozono y dióxido de nitrógeno en las estaciones rurales gallegas B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda para los cuatro días centrales del episodio nº 10 (30 Julio -16 Agosto 2003), mostrando el aumento progresivo de dióxido de nitrógeno hasta registrar la concentración máxima de ozono horario en la tarde del día 7 de Agosto”

Las retrotrayectorias descritas por las masas de aire durante las 72 previas al registro del máximo episódico (figura 3.115, derecha) realizan un recorrido por el interior peninsular, desde el sur hasta el nordeste de Portugal antes de entrar en Galicia, de acuerdo con el flujo sinóptico dominante del sureste. Esta situación no permite descartar la influencia del transporte alóctono procedente del sur durante este episodio, sobre todo teniendo en cuenta los importantes valores de ozono registrados en la zona durante esos días, según indica la figura 3.112. A pesar de ello, es notable el mantenimiento de estas masas de aire sobre Galicia durante el episodio, pues permanecen más de 40 horas en territorio gallego o en sus inmediaciones, antes de registrarse el máximo de la jornada del 7 de Agosto, día a partir del cual se observa la persistencia nocturna de los niveles de ozono. Por el contrario, las retrotrayectorias representadas para la tarde de la jornada previa, día 6 de Agosto, con menores niveles de inmisión de ozono, presentan una menor permanencia sobre el noroeste peninsular, notablemente inferior a 24 horas, y con una procedencia muy similar (figura 3.115, izquierda). Esta característica apunta de nuevo a la generación local y a la recirculación de masas de aire sobre el noroeste como principales causas del episodio de ozono nº 10, de modo similar a la situación experimentada en el resto de Europa, aunque la importancia del transporte externo procedente del centro-oeste peninsular no debería ser menospreciada.

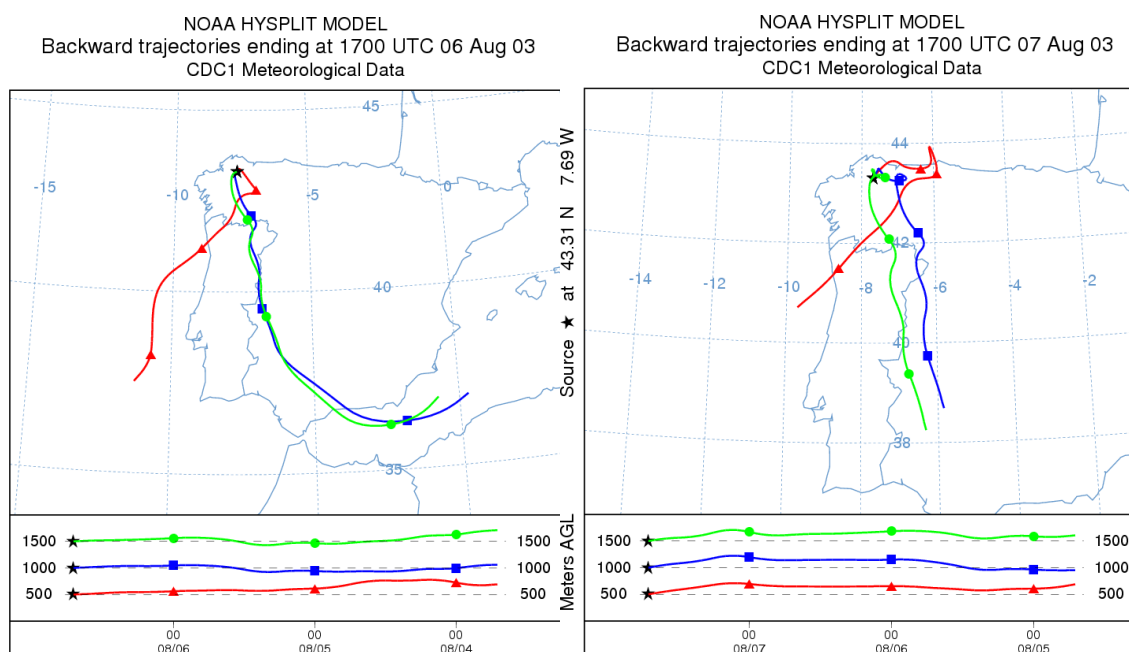


Figura 3.115: “Retrotrayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 6 (izquierda) y en las 72 previas al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 7 (derecha), que coincide con el máximo horario del episodio nº 10 (30 Julio-16 Agosto de 2003). Las trayectorias finalizan en la estación C9-Mourence a tres alturas diferentes: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). Destaca el progresivo estancamiento de las masas de aire, indicado por la mayor duración temporal del recorrido por el interior de Galicia efectuado en las trayectorias del día 7”

En conclusión, el episodio nº 10 puede considerarse como un ejemplo de los episodios de tipo local, caracterizados por las temperaturas excepcionalmente altas alcanzadas en el noroeste peninsular, el estancamiento de las masas de aire (favorecida por la recirculación asociada a una débil intensidad del viento sinóptico) y el aumento de la inmisión de precursores fotoquímicos de origen industrial, como los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ , que provocan los valores máximos episódicos en estaciones de carácter suburbano, en general.

### Origen luso

El episodio nº 11 (12-22 Septiembre de 2003) se ha clasificado dentro de los episodios de carácter alóctono, causado por el transporte de masas de aire con alto contenido en ozono procedentes del norte de Portugal, aunque la formación fotoquímica local también desempeña un importante papel (Saavedra et al., 2007).

La situación sinóptica está dominada por un potente anticiclón situado inicialmente al suroeste de las Islas Británicas, que va desplazando progresivamente su centro de altas presiones en dirección nordeste, hasta situarse sobre Centroeuropa (figura 3.116). La influencia de este sistema de altas presiones, que abarca toda la Europa atlántica incluyendo la península Ibérica, junto con las bajas presiones norteafricanas, provoca una circulación de dirección E-SE, cuya intensidad se va debilitando a medida que el centro anticiclónico se mueve hacia el interior del continente europeo. En altura, la dorsal anticiclónica sitúa su eje sobre la península Ibérica, las Islas Británicas, Francia y Alemania occidental, contribuyendo a mantener una situación de gran estabilidad y altas temperaturas.

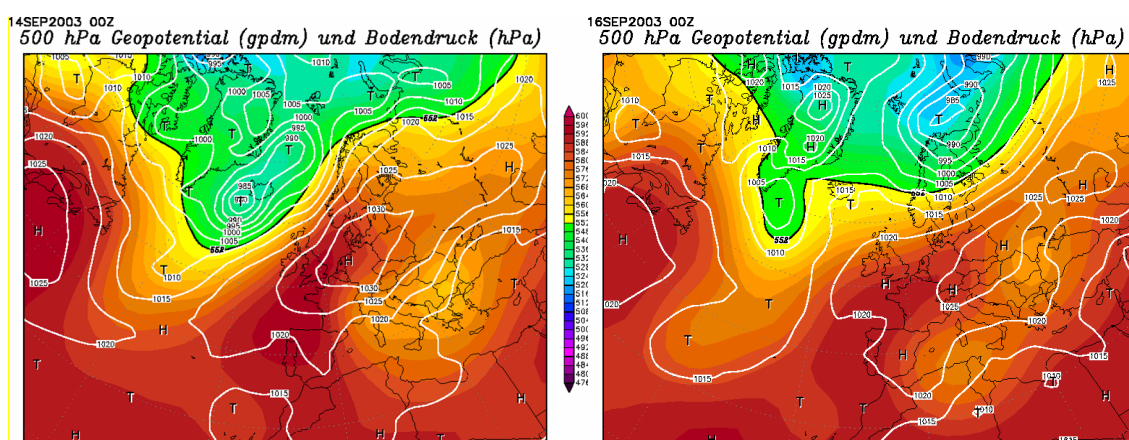


Figura 3.116: "Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) mostrando los campos de presión superficial y altura del geopotencial a 500 hPa para los días 14 y 16 de Septiembre de 2003, jornadas centrales del episodio nº 11 (12 - 22 Septiembre de 2003), reflejando el desplazamiento del anticiclón hacia Europa Central y el debilitamiento de flujo sinóptico de dirección E-SE sobre el noroeste peninsular "

El noroeste peninsular no fue la única región con altas concentraciones de ozono durante este período, pues las condiciones sinópticas, al afectar a todo el oeste europeo, también causaron importantes ascensos en los niveles de inmisión de ozono en el Reino Unido (Kent, 2003), debido a las altas temperaturas, los cielos despejados y las retrotrayectorias procedentes del continente, aproximando masas de aire con importantes concentraciones de precursores fotoquímicos, como compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno.

Las concentraciones de ozono en el litoral noroeste peninsular (B2-Louseiras, F2-Fraga Redonda, B1-A Magdalena, ...) son sistemáticamente superiores a las registradas en las estaciones EMEP más próximas (Niembro, en la costa cantábrica asturiana, y Peñausende, perteneciente a la provincia de Zamora, en el interior de la meseta castellana). Los niveles de ozono también son mayores en la costa que en el interior de Galicia (O Saviñao y C9-Mourence), lo cual apunta a la existencia de masas de aire con mayor contenido de ozono troposférico en el litoral atlántico (figura 3.117). No se hace referencia a registros de inmisión en el país luso dada la falta de estaciones representativas de tipo rural en el norte portugués para el año 2003, en el cual aún no estaban operativas las estaciones de Senhora de Minho e Lamas de Olo; se soslayará esta carencia de datos asumiendo como válida la predicción a 24 horas efectuada por los modelos de calidad de aire EURAD y Chimere, según se propone más adelante.

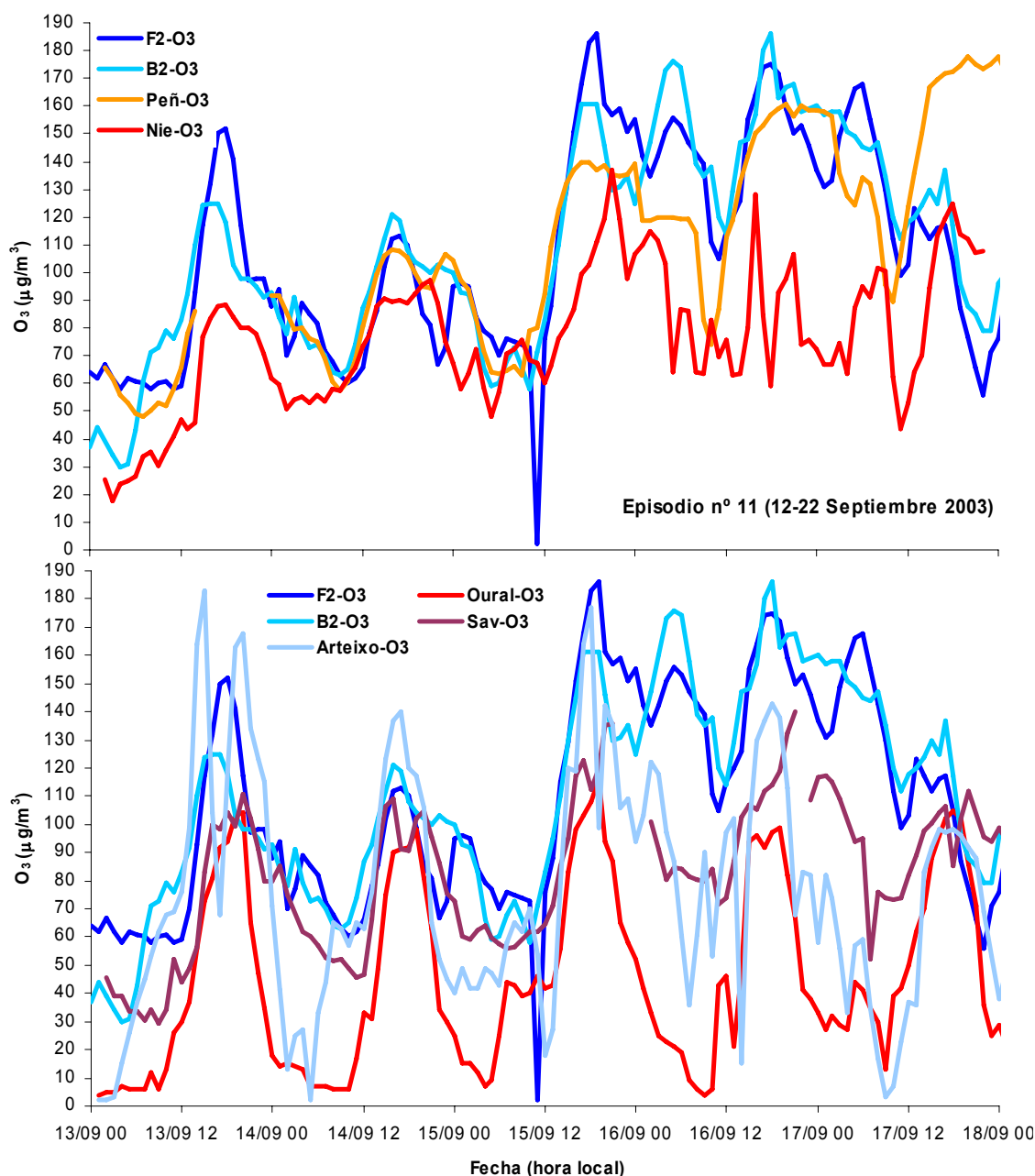


Figura 3.117: “Comparación de las series temporales de concentración superficial de ozono en las estaciones gallegas próximas a la costa (B2-Louseiras, F2-Fraga Redonda y la estación móvil situada temporalmente en Arteixo-Oseiro) frente a las estaciones EMEP del noroeste peninsular, como la estación asturiana de Niembro y la zamorana de Peñausende (arriba), y frente a otras estaciones situadas en el interior de Galicia, como la estación EMEP de O Saviñao y la estación de Oural, ambas en Lugo (abajo). La series incluyen los cinco días centrales del episodio nº 11 (12-22 Septiembre 2003), destacando las concentraciones registradas en el litoral norte de A Coruña, que superan los  $180 \mu g/m^3$  en varias ocasiones, frente a los valores inferiores registrados en el interior de Galicia y las áreas limítrofes de Castilla y Asturias”

Las masas de aire que alcanzan el noroeste de A Coruña el día 16, que registra la máxima concentración de ozono del episodio, recorren previamente la costa norte portuguesa, según indican las simulaciones realizadas con el modelo Hysplit (figura 3.118); la trayectoria durante los tres días previos al día 15, que ya registra notables niveles de ozono en las estaciones costeras gallegas, es diferente e incluye el interior de Francia y la cornisa cantábrica por su parte más interna. El mayor recorrido de las trayectorias durante los primeros días del episodio se explica por un gradiente barométrico más intenso, que causa una mayor intensidad del flujo sinóptico hasta el día 15, cuando se aprecia una notable disminución de la velocidad de viento.

Por otra parte, al aumentar la resolución de simulación, desde 2.5° en reanálisis NCEP usados por Hysplit hasta 3 km en la malla interna de simulaciones realizadas con el modelo meteorológico MM5 (figura 3.119), las trayectorias para ambas jornadas sí son muy similares, recorriendo ambas el litoral norte de Portugal hasta entrar en Galicia por la costa atlántica.

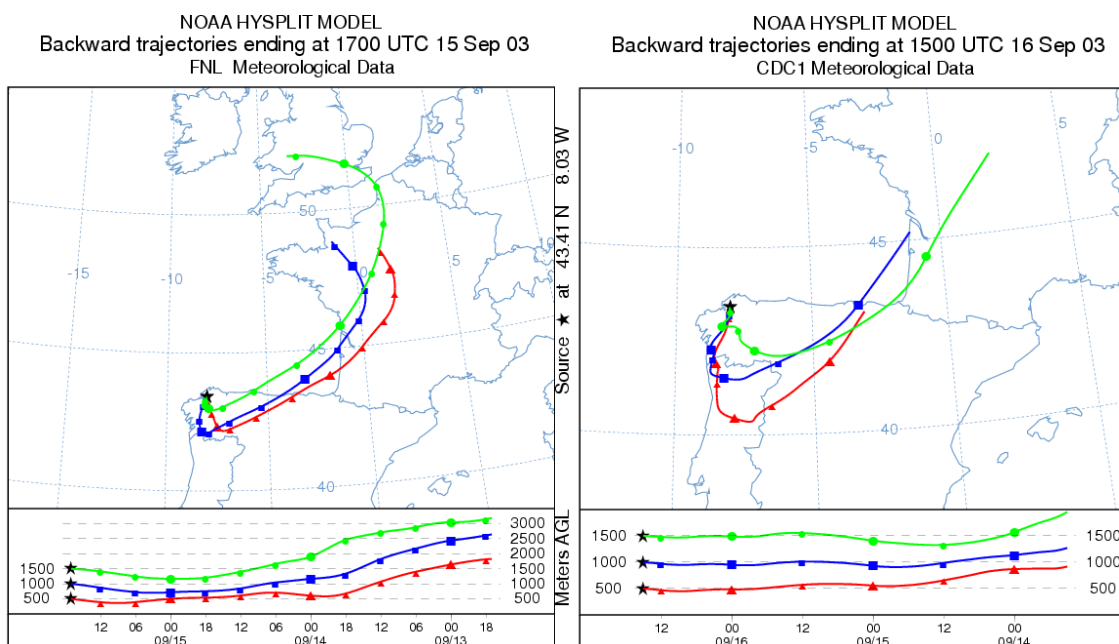


Figura 3.118: “Retrotrayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 15 (izquierda) y en las 72 previas al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 16 (derecha), que coincide con el máximo horario del episodio nº 11 (12 -22 Septiembre de 2003). Las trayectorias finalizan en la estación G2-Vilanova a tres alturas diferentes: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). Destaca el recorrido inicial por el interior de Francia y el norte peninsular antes de entrar en Galicia el día 15, y el desplazamiento hacia la costa norte de Portugal durante las 36 horas anteriores al registro de la concentración máxima del episodio”

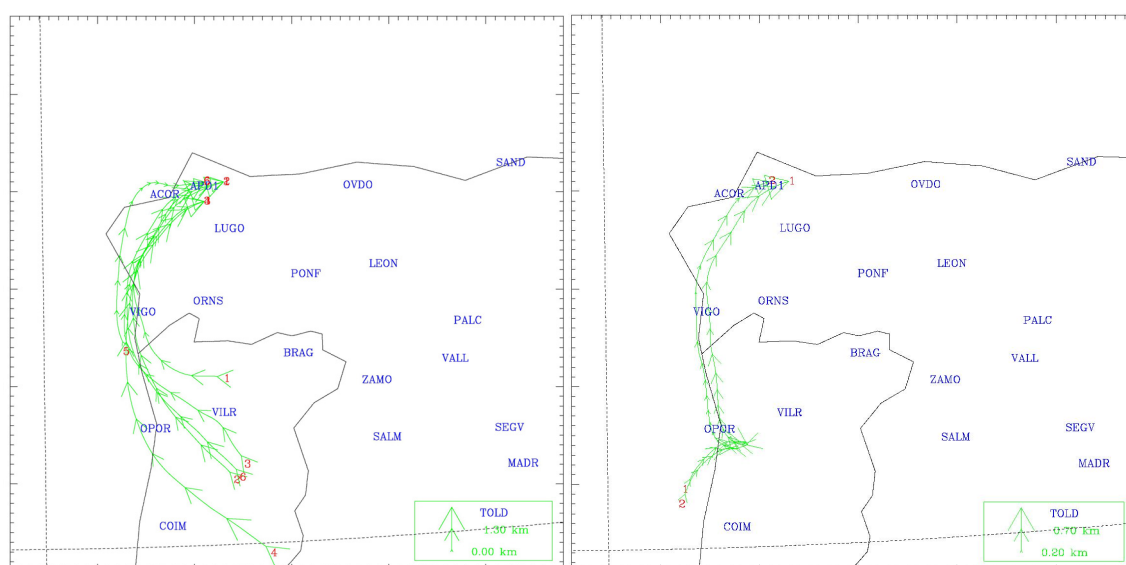


Figura 3.119: “Retrotrayectorias simuladas con el modelo meteorológico MM5 a una resolución de 3 km para los días 15 y 16 de Septiembre de 2003. La figura de la izquierda muestra el recorrido de las masas de aire durante las 12 horas previas a las 17 UTC del día 15, mientras la figura de la derecha representa el recorrido durante las 24 horas anteriores a las 17 UTC del día 16. Ambas trayectorias han sido calculadas con llegada en las estaciones B2-Louseiras, F2-Fraga Redonda (sólo el día 15) y G2-Vilanova a 500 m y 1000 m de altura (sólo el día 15)”



Las predicciones de calidad de aire a 24 horas realizadas por el modelo EURAD parecen confirmar la llegada a las costas gallegas de aire con elevados niveles de ozono procedente de las costas portuguesas, según se observa en la figura 3.120: las masas de aire enriquecidas con ozono, formado a partir de precursores liberados en el área de Oporto y Lisboa, son empujadas hacia el noroeste peninsular debido al viento sinóptico dominante, de componente sur, y penetran hacia el interior de Galicia favorecidos por el establecimiento de brisas marinas del oeste durante las horas centrales del día. Las predicciones del modelo Chimere (Prev'Air, 2009), avaladas por el Ministerio de Ecología y Desarrollo Sostenible de Francia, no presentan diferencias significativas con las proporcionadas por el modelo EURAD, apoyando la hipótesis del transporte de ozono desde el litoral atlántico de Portugal hacia las costas gallegas (no mostradas).

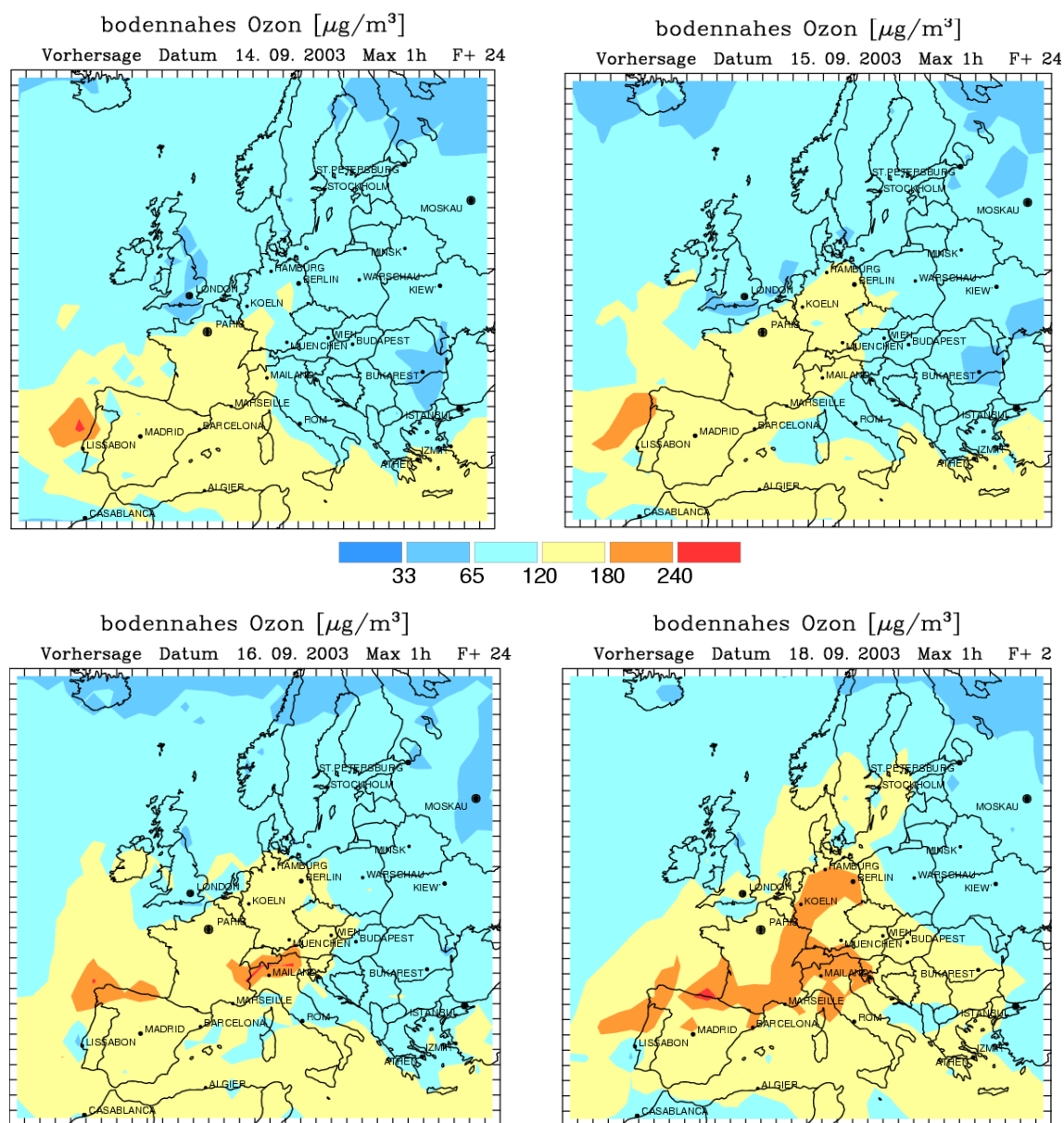


Figura 3.120: "Predicciones de calidad del aire (máximo horario de  $O_3$ ) sobre Europa occidental realizadas por el modelo EURAD para los días 15-18/09/2003, correspondientes al episodio nº 11 (12-22 Septiembre de 2003). Se observa la llegada al litoral gallego de masas de aire con alto contenido en ozono, procedentes del litoral norte de Portugal"

En el análisis de la meteorología local durante el episodio destaca el régimen de vientos, factor importante en el desarrollo del episodio: el viento sinóptico presenta componente Este en superficie (figura 3.121, arriba), rolando hacia el S-SE en altura (según indican los radiosondeos lanzados sobre a Coruña y los registros de viento a 80 m en la estación D1-A Mourela), pero las tardes de los días 13, 15 y 16 se caracterizan por el establecimiento de brisas marinas de componente Oeste.

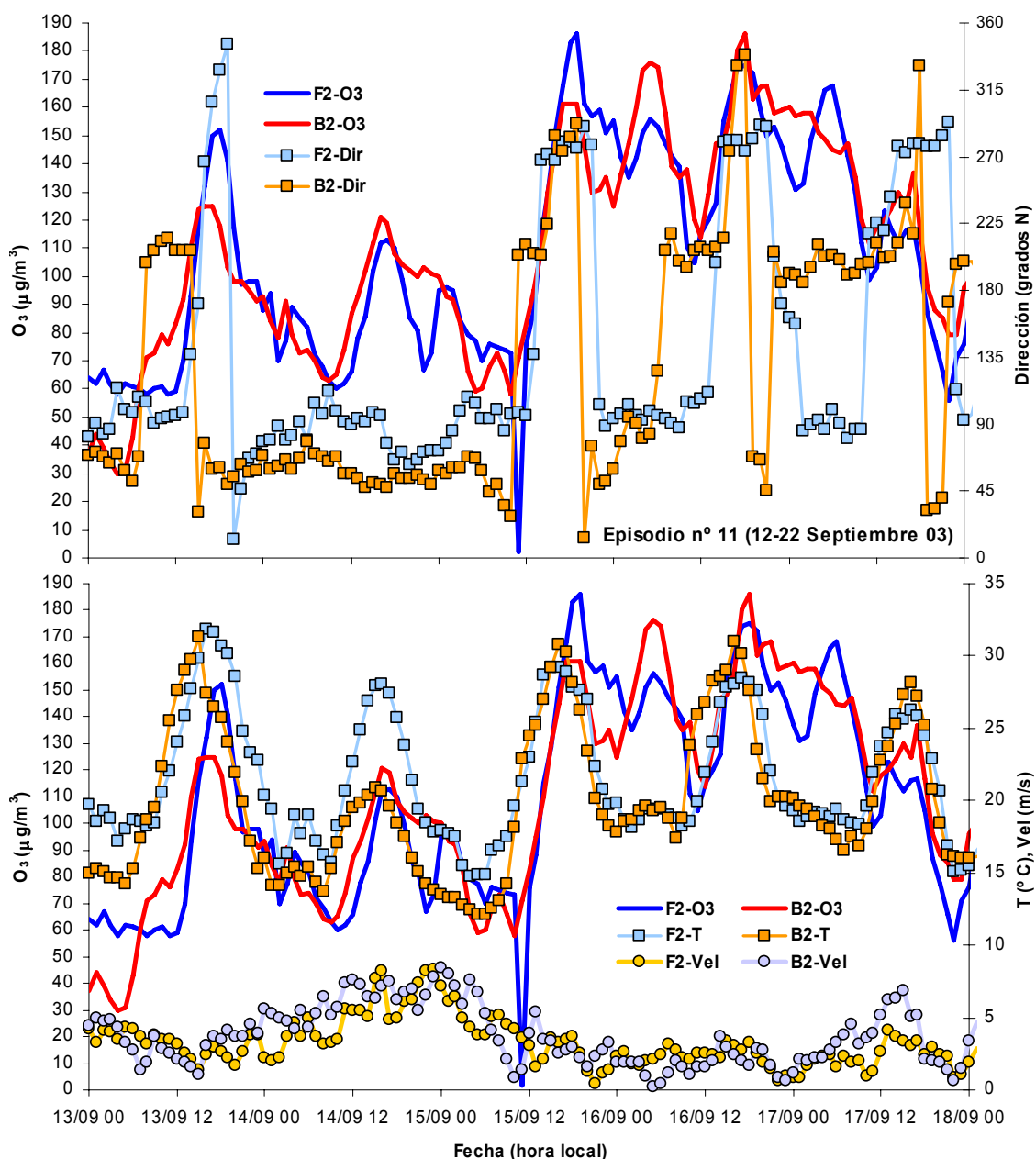


Figura 3.121: “Series temporales de dirección de viento a 10 m (arriba) y de temperatura superficial a 2 m y velocidad de viento a 10 m (abajo) frente a concentración de ozono para las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, durante las cinco jornadas centrales del episodio nº 11 (12-22 Septiembre de 2003). Destaca el aumento de los niveles de ozono coincidiendo con el establecimiento de las brisas, consecuencia de la elevación de temperatura y de la disminución de la intensidad del viento sinóptico”

Estas brisas marinas coinciden con los períodos con mayores niveles de ozono, contribuyendo a la entrada hacia el interior de las masas de aire que ascienden por el litoral atlántico procedentes de las costas portuguesas y de las Rías Baixas. Por otra parte, la persistencia de ozono durante la madrugada de los días 16 y 17 también parece evidenciar el efecto de las



brisas, ya que favorecen la creación de células de recirculación de aire (Evtugina et al., 2006; Gangoiti et al., 2002, 2006): el aire con los importantes niveles de ozono medidos alrededor de las 17 UTC es inyectado en altura y devuelto hacia las capas de aire situadas sobre el mar, pero al invertirse la circulación durante la noche, con brisas terrestres, los estratos marinos en altura vuelven a penetrar en el interior. Si el período nocturno presenta cierto grado de inestabilidad, podría producirse mezcla turbulenta de los estratos enriquecidos con ozono y producir los repuntes nocturnos que se observan durante la noche de los días 16 y 17. Aunque no se dispone de datos suficientes para determinar la estabilidad del área, el comportamiento de la temperatura superficial en las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda evidencia la posibilidad de una disminución de la fortaleza de la capa estable nocturna con respecto a las jornadas precedentes, ya que la temperatura nocturna se mantiene bastante estable, registrando incluso algún repunte apreciable durante la noche (más de 1.5 °C la madrugada del día 15 en la estación B2, coincidiendo con un máximo relativo nocturno de ozono).

La temperatura, notable durante el día (28 °C - 32 °C de máxima en B2 y F2), también podría contribuir a explicar el aumento de la inmisión de ozono durante los días 13, 15 y 16, al potenciar la generación fotoquímica debido, entre otros factores, al aumento de la emisión de compuestos orgánicos volátiles de naturaleza biogénica o BVOCs, modificando de ese modo la relación NO<sub>x</sub>/VOCs. Aún así, parece claro que el posible incremento de la producción local, a través de la temperatura, no es el único factor causal del aumento de ozono durante los días 13, 15 y 16, pues la evolución térmica y la temperatura máxima registrada durante los días 14 y 15 en la estación F2-Louseiras es muy semejante, y sin embargo la concentración máxima de ozono es muy superior el día 15 (112 µg/m<sup>3</sup> frente a 186 µg/m<sup>3</sup>). Sin embargo, sí existe una apreciable diferencia meteorológica entre ambas jornadas: el desarrollo de brisas a partir del mediodía durante la jornada 15. Este fenómeno local no se produjo el día anterior, quizá debido a la mayor intensidad del viento sinóptico durante el día 14, como reflejan las series de intensidad de viento de la figura 3.121 (abajo), apoyando la hipótesis planteada sobre la importancia de los vientos locales durante este episodio.

A pesar de la influencia del transporte regional de ozono desde el litoral portugués, considerado como causa principal del episodio, la importancia de la formación local de ozono no se puede obviar durante el período analizado, debido a las favorables condiciones meteorológicas (viento flojo, radiación y temperatura elevadas, ...). Las series de NO<sub>x</sub> y material particulado PM10 también muestran un aumento a partir del día 15 en las estaciones rurales del norte de A Coruña (B2-Louseiras, F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova), y se producen incrementos bruscos y muy acusados de SO<sub>2</sub> en estaciones como B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, lo que apunta hacia la disponibilidad de otros precursores fotoquímicos de origen industrial para la generación local de ozono.

En resumen, el análisis del episodio nº 11 apunta hacia el transporte regional desde la costa septentrional de Portugal como principal razón para las altas concentraciones de ozono registradas en las estaciones de la Red Gallega de Calidad de Aire, favorecido por los vientos sinópticos de componente S y el desarrollo de brisas marinas en el litoral gallego, aunque no se puede descartar la importante contribución de la generación "in situ" de ozono a partir de precursores fotoquímicos emitidos preferentemente a lo largo de la costa gallega.

#### *Origen franco-cantábrico*

El episodio nº 20 (09-15 Julio de 2005) ha sido considerado como episodio de origen alóctono, provocado principalmente por el transporte de masas de aire enriquecidas en precursores nitrogenados y ozono ya formado a través del litoral cantábrico peninsular, procedentes de Europa Central (Francia, Alemania, etc.), sin descartar el importante aporte local de ozono y precursores fotoquímicos. En Europa, este período fue el más caluroso del verano, y provocó el segundo episodio en importancia de todo el verano del 2005 (European Environment Agency, 2006), de acuerdo con los niveles de ozono alcanzados (entre el 2% y el 7% de estaciones europeas superó el umbral de información a la población y más del 25% el umbral octohorario de protección a la salud humana), afectando sobre todo a los países mediterráneos (Portugal, España, Italia y Grecia) y a Francia, Alemania y Reino Unido (Targa, 2005).

Una vez más, las condiciones sinópticas relacionadas con este episodio se caracterizan por la existencia de una extensa área de altas presiones en altura, y la circulación anticiclónica, provocando el estancamiento de las masas de aire sobre gran parte de Europa. En concreto, la península Ibérica se ve afectada por la entrada y reforzamiento del anticiclón de las Azores, que se desplaza progresivamente hacia el este, hasta situarse sobre las Islas Británicas los días 11 y 12 (figura 3.122, izqda.), acompañado por una dorsal anticiclónica en altura, afectando sobre todo al oeste de la península Ibérica y a las Islas Británicas. Esta situación provoca una circulación sinóptica de componente E, relativamente intensa debido a las bajas presiones características del norte de África, que comprimen las isobaras en el norte peninsular; posteriormente, el aumento de la inestabilidad en altura al oeste de Portugal favorece el desarrollo de un centro relativo de bajas presiones en superficie (figura 3.122, dcha.), disminuyendo lentamente la influencia anticiclónica sobre el occidente peninsular durante los días 13, 14 y 15, que sin embargo continúa afectando al resto del Mediterráneo.

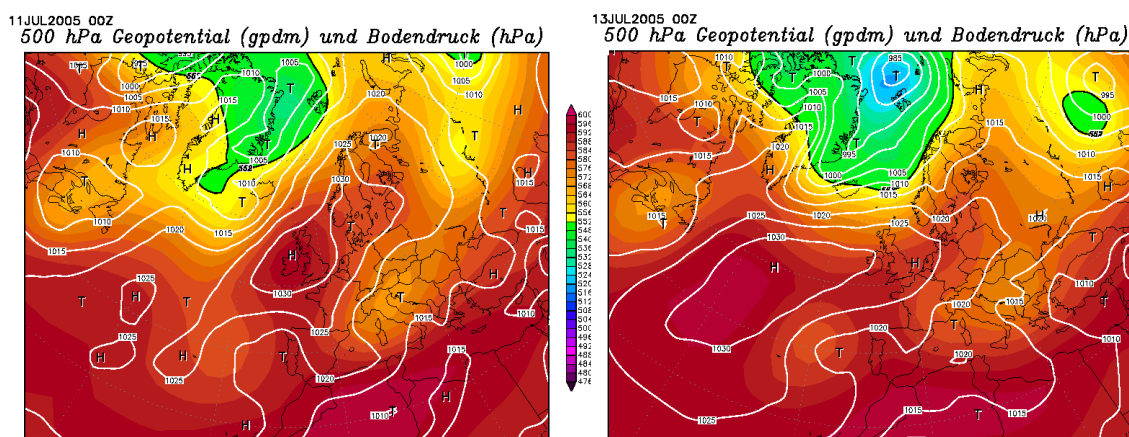


Figura 3.122: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) mostrando los campos de presión superficial y altura del geopotencial a 500 hPa para los días 11 y 13 de Julio de 2005, jornadas centrales del episodio nº 20 (09 - 15 Julio de 2005), destacando la notable circulación de componente E sobre el norte peninsular y la dorsal anticiclónica con su eje atravesando el oeste de la península Ibérica y las Islas Británicas ”

La entrada de condiciones anticiclónicas causa una elevación continua de los registros de ozono en todas las estaciones del noroeste peninsular (figura 3.123), destacando los registros de las estaciones del norte de Portugal, en especial los excepcionales valores registrados en la estación portuguesa de Lamas de Olo, causados por fenómenos de recirculación local. Sin embargo, teniendo en cuenta los flujos sinópticos, apoyados por la modelización de retro trayectorias, no parece haber relación directa entre la inmisión de ozono en el norte de Portugal y la inmisión de Galicia, más allá de la existencia de una meteorología favorable para la generación fotoquímica de ozono.

Las estaciones gallegas presentan un crecimiento continuo desde el día 10, hasta alcanzar la concentración máxima de ozono la tarde del día 13, en general con valores muy similares, sobre todo en las estaciones más septentrionales (B2-Louseiras, F2-Fraga Redonda y G2-Vilanova), y ligeramente superiores a las estaciones más meridionales (Marín y O Saviñao). El mantenimiento de los valores de ozono superficial durante las madrugadas de las jornadas 12 y 13 en estos emplazamientos costeros apunta hacia un posible transporte de ozono durante ese período. Los valores de las estaciones EMEP de Peñausende (Zamora) y Niembro (Asturias) registran un patrón de inmisión de ozono similar a las estaciones gallegas, siendo relevante la concentración máxima medida en Niembro el día 13, al alcanzarse los máximos valores de todo el año 2005 en dicha estación, exceptuando un registro puntual superior de mediados de Junio.

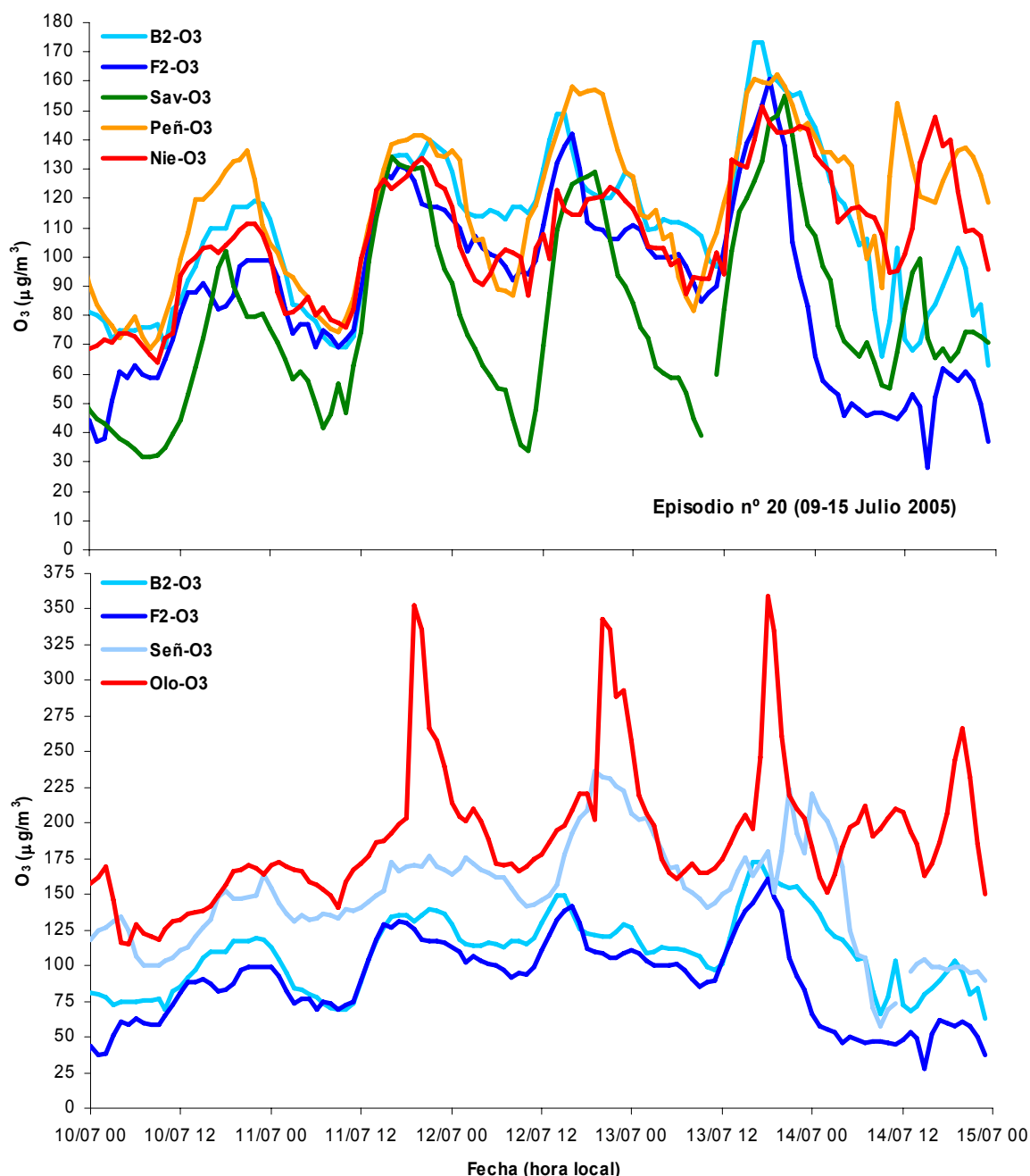


Figura 3.123: “Comparación de las series temporales de concentración superficial de ozono en estaciones gallegas septentrionales próximas a la costa (B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda) frente a las estaciones EMEP del noroeste peninsular, como la estación asturiana de Niembro, la zamorana de Peñausende y la lucense de O Saviñao (arriba). Las series inferiores muestra las notables diferencias de inmisión entre las estaciones gallegas, con niveles sensiblemente inferiores, y las estaciones del norte de Portugal (una interior, Lamas de Olo, y otra costera, Senhora do Minho). Las series incluyen los cinco días centrales del episodio nº 20 (09-15 Julio 2005), destacando la similitud y el aumento progresivo de las concentraciones medidas en las estaciones del litoral norte peninsular, frente a los valores muy superiores de las estaciones portuguesas”

Los datos meteorológicos recogidos en las estaciones del norte de la provincia de A Coruña son un claro reflejo de las condiciones anticiclónicas dominantes. El viento en superficie se mantiene de componente Este (NE en B2-Louseiras y E en F2-Fraga Redonda, al igual en A Mourela a 80 m de altura) durante todo el período previo al máximo registro de ozono, coincidiendo con la circulación sinóptica, pues no hay establecimiento de fenómenos locales, debido a la apreciable intensidad de viento hasta las últimas horas del día 14, una vez registrada la concentración de ozono más elevada de todo el episodio (figura 3.124, arriba).

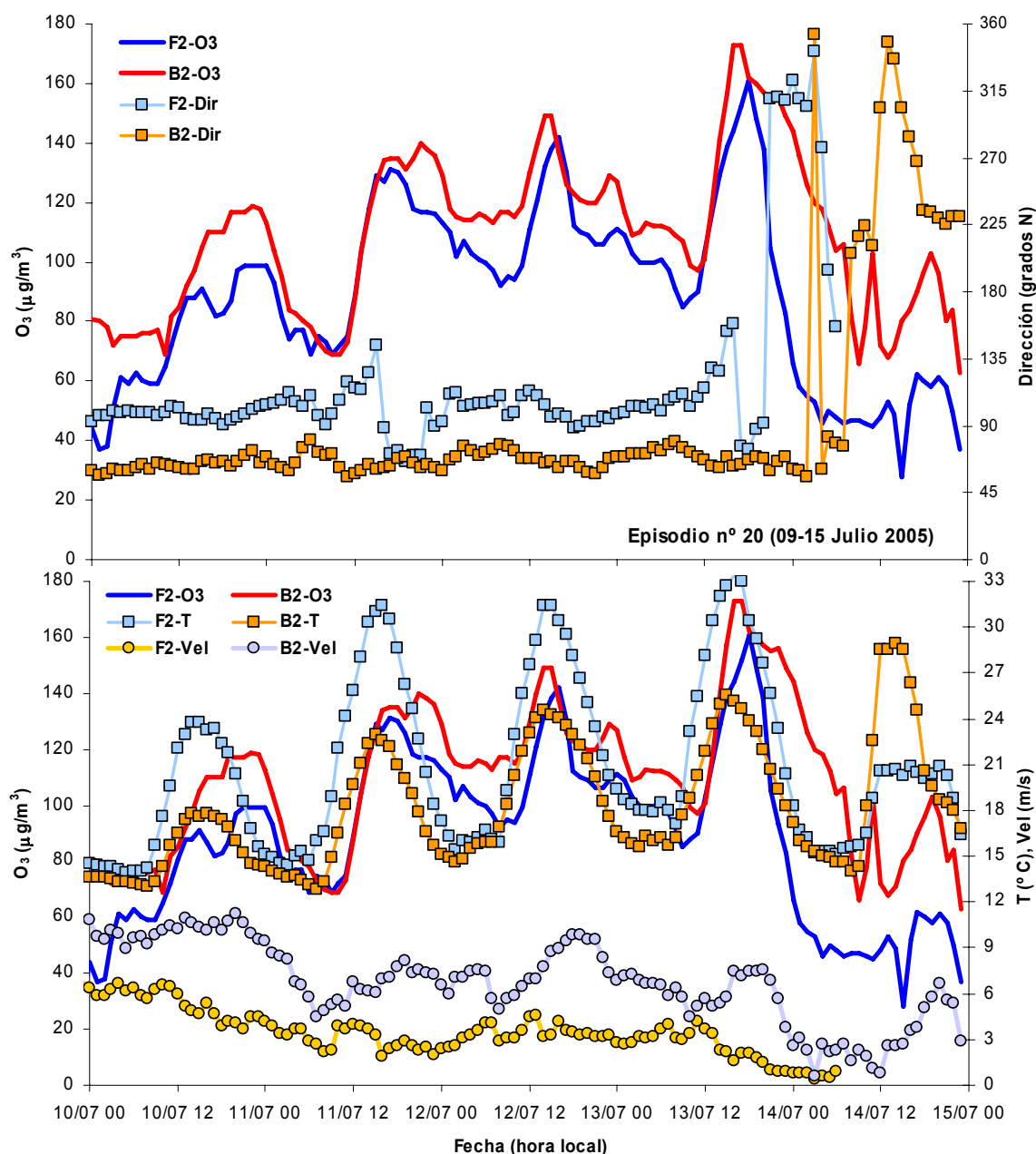


Figura 3.124: “Series temporales de dirección de viento a 10 m (arriba) y temperatura superficial a 2 m y velocidad de viento a 10 m (abajo) frente a concentración de ozono para las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, durante las cinco jornadas centrales del episodio nº 20 (09-15 Julio de 2005). Sobresale el mantenimiento de la componente Este en la dirección de viento durante todo el período previo al establecimiento del máximo, así como la velocidad media del viento, que dificulta el desarrollo de brisas marinas y otros vientos locales, a pesar de las temperaturas, que oscilan entre 30 °C y 33 °C en la estación F2-Fraga Redonda”

La temperatura máxima supera los 30 °C durante los tres días centrales del episodio en la estación F2-Fraga Redonda, pero se queda muy por debajo de esos niveles en la estación B2-Louseiras, con máximas inferiores a los 26 °C en esas jornadas, debido a la superior velocidad de viento, que impide su recalentamiento al incrementar su renovación (figura 3.124, abajo). Esta diferencia térmica entre ambas estaciones es una situación bastante común en la zona durante días ligeramente ventosos, debido a la menor protección orográfica de la estación B2 con viento nordés. Sin embargo, estas acusadas diferencias no parecen afectar directamente a los niveles máximos de ozono, un poco superiores en B2-Louseiras; aún así, también debe

tenerse en cuenta los mayores umbrales nocturnos en B2, de modo que el aumento diurno alcanzaría niveles similares en ambas estaciones. Independientemente de la causa, la generación fotoquímica local, a pesar de su importancia en este episodio, no parece ser el único factor en el desarrollo de este episodio, pues los más de 8 °C de salto entre las temperaturas máximas de ambas estaciones deberían tener algún reflejo en los incrementos diurnos de ozono de dichas estaciones, lo cual no sucede. Por tanto, es probable la influencia del transporte de ozono desde zonas alejadas como factor unificador de los niveles de ozono en el norte de la provincia de A Coruña.

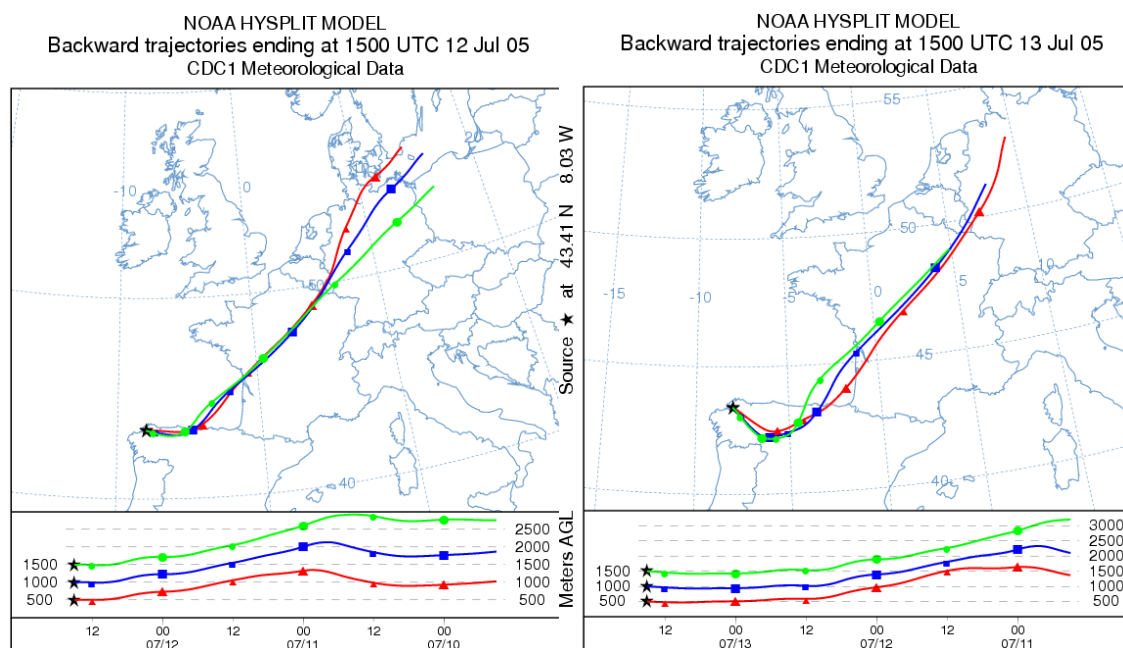


Figura 3.125: “Retrotrayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 12 (izquierda) y al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 13 (derecha), que coincide con el máximo horario del episodio nº 20 (9-15 Julio de 2005). Las trayectorias finalizan en la estación G2-Vilanova a tres alturas diferentes: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). Destaca el recorrido inicial por el oeste de Alemania, el interior de Francia y el litoral norte peninsular antes de entrar en Galicia, así como el desplazamiento hacia el norte de la Submeseta Norte castellana durante las 36 horas anteriores al registro de la concentración máxima del episodio”

Esta hipótesis basada en la importancia del transporte regional de masas de aire con alto contenido en ozono desde áreas alejadas del noroeste peninsular se ve reforzado por el análisis de trayectorias simuladas mediante el modelo Hysplit: las trayectorias se inician en el oeste de Alemania, recorriendo el centro de Francia antes de penetrar en la península Ibérica por la costa cantábrica oriental, una vez atravesado el golfo de Vizcaya, y dirigiéndose posteriormente hacia el oeste por el litoral cantábrico (figura 3.125, izqda.). La trayectoria correspondiente al día 13, jornada que registra el máximo, muestra como peculiaridad el lento recorrido efectuado por las masas de aire sobre el norte de la Submeseta Norte castellana durante la jornada 12 (figura 3.125, dcha.), siendo ésta un área que se caracteriza por la importante concentración de centrales térmicas de carbón, por lo cual presenta una de los mayores emisiones de NO<sub>x</sub> de toda la Unión Europea (figura 3.126, dcha.). En resumen, las trayectorias seguidas por las masas atmosféricas que entran en Galicia durante este episodio pasan por la vertical de un gran número de fuentes importantes de precursores fotoquímicos de ozono (oeste de Alemania y Francia, litoral cantábrico, y sobre todo, el área de León y Ponferrada, en España). Por otra parte, aunque estas trayectorias ya reflejan la independencia de los niveles de inmisión en Galicia con los de las estaciones del norte de Portugal, se ha simulado la trayectoria para los mismos días en la estación de Lamas de Olo (figura 3.126, izqda.), observando una procedencia completamente distinta de las masas de aire que

alcanzan el norte de Portugal, además del menor recorrido espacial efectuado por las mismas: las trayectorias recorren el centro-sur peninsular, efectuando una pequeña recirculación sobre la Submeseta Sur. En el caso de la estación portuguesa, el origen de los elevados niveles de ozono troposférico parece estar en el transporte de ozono desde el litoral oeste de Portugal, conb grandes áreas urbanas como la ciudad de Porto, debido al régimen local de brisas dominante, favorecido por el débil gradiente barométrico existente en el interior de la península Ibérica, a diferencia de la costa cantábrica.

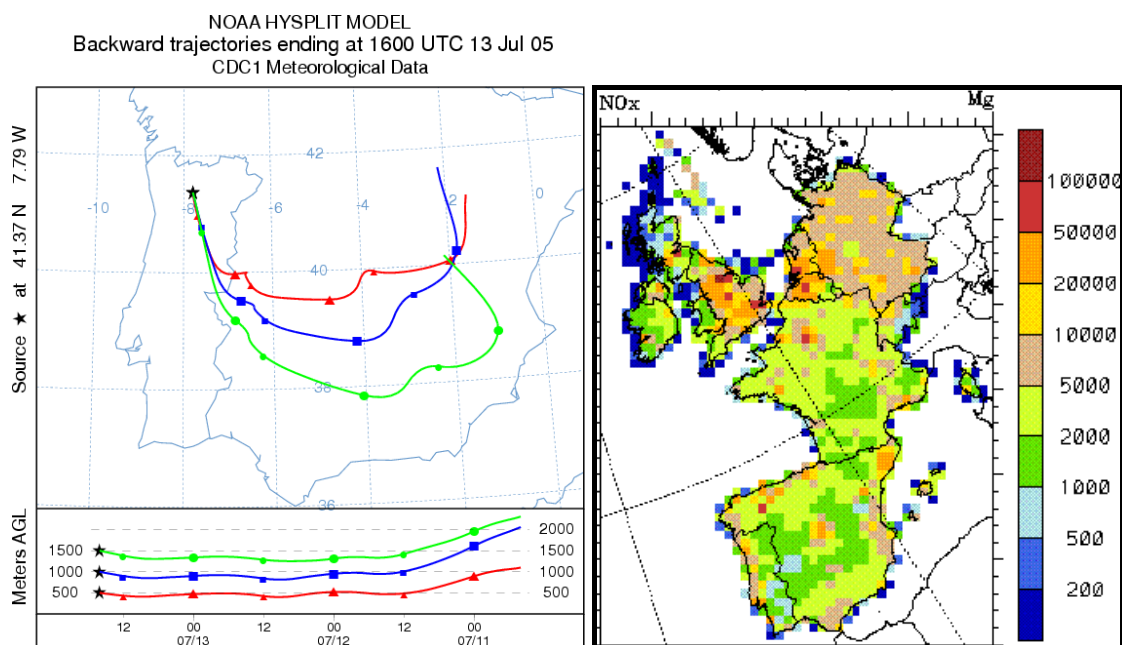


Figura 3.126: “Retrotrayectorias (izquierda) seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 13, correspondiente al episodio nº 20 (09-15 Julio de 2005), en la estación rural portuguesa de Lamas de Olo, finalizando a tres alturas diferentes: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). Contrasta la permanencia de las masas de aire sobre el centro peninsular y su origen mesetario, frente al cantábrico-europeo de las trayectorias que entran en Galicia. La figura de la derecha representa las emisiones de NOx en Tm/año para el oeste de Europa en el año 2005 (fuente: European Monitoring and Evaluation Programme, 2009). Se observa que las retrotrayectorias que finalizan en el noroeste peninsular durante este episodio circulan por algunas de las áreas con mayor emisión de precursores nitrogenados de Europa”

Las predicciones de calidad de aire a 24 horas para Europa, realizadas por los modelos EURAD y Chimere muestran el desplazamiento y acumulación de estratos de aire con altos contenido en ozono sobre el litoral cantábrico (figura 3.127): el flujo sinóptico de componente E-NE favorece el estancamiento sobre el mar Cantábrico de masas de aire enriquecidas con ozono, formado a partir de precursores emitido en el borde atlántico de Europa, hasta que la entrada de un débil centro de bajas presiones por el Atlántico durante el día 14 cambia la circulación sinóptica a componente Oeste en la costa cantábrico, transportando el ozono en dirección opuesta, de modo que las áreas con mayor concentración diaria de ozono se sitúan sobre el golfo de Vizcaya durante el día 14. Las simulaciones del modelo EURAD (no mostradas) no presentan grandes diferencias con las establecidas por el modelo Chimere, reflejando la misma distribución de las área europeas con mayor contenido en ozono troposférico.



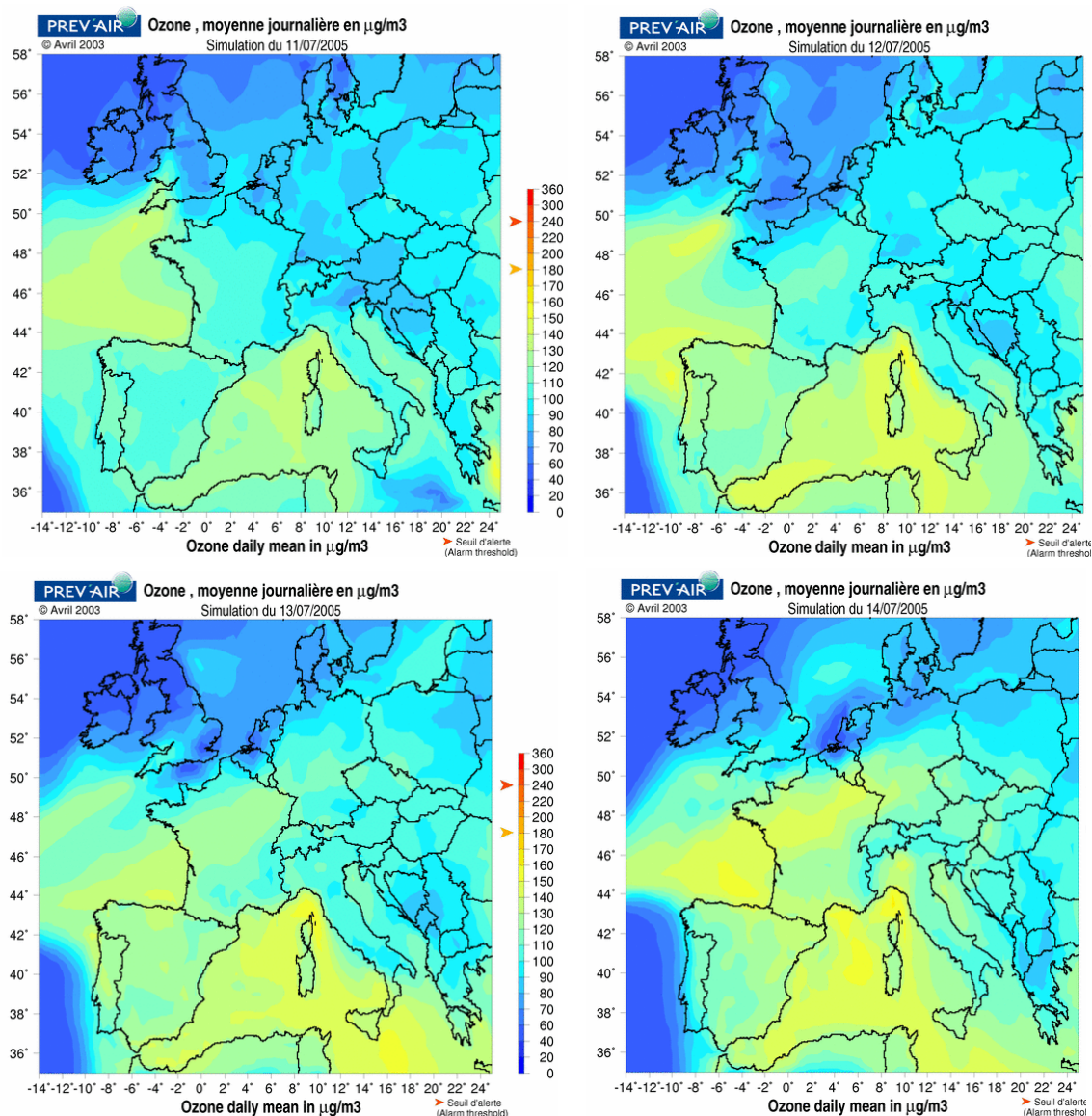


Figura 3.127: “Predicciones de calidad del aire (media diaria de  $O_3$ ) sobre Europa occidental realizadas por el modelo Chimere para los días 11-14/07/2005, mostrando la llegada al noroeste peninsular de masas de aire con alto contenido en ozono, procedentes del occidente europeo y el litoral cantábrico. Fuente: Prev’Air, 2009”

Como en la mayoría de los episodios considerados de origen alóctono, la generación fotoquímica local de ozono es otro factor que desempeña un papel importante en el aumento de los niveles de ozono en las estaciones gallegas, debido a la elevada radiación solar y al incremento térmico registrado durante el episodio. Sin embargo, las concentraciones de  $NO_2$  no experimentan cambios significativos durante el mismo, mientras sí se observa un pequeño aumento de los niveles de  $SO_2$  a lo largo del episodio en las estaciones cantábricas, lo cual podría indicar transporte desde regiones situadas más al este, dada la dirección del viento sinóptico (figura 3.128).

Como conclusión, el análisis del episodio nº 20 parece aportar suficientes indicios para sostener la hipótesis del transporte regional de precursores nitrogenados y ozono hacia el noroeste peninsular, procedentes de la zona atlántica europea en primera instancia, y posteriormente del litoral cantábrico, sin descartar una importante formación autóctona que contribuya a elevar los registros de inmisión de ozono troposférico en este período.



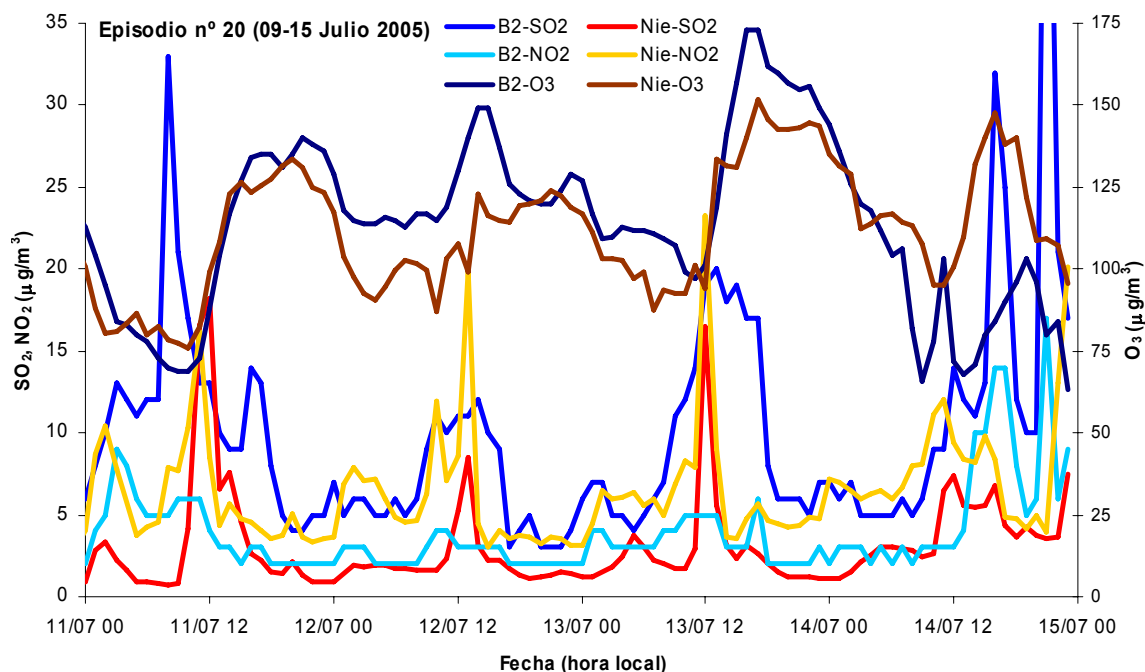


Figura 3.128: “Comparación de las series temporales de concentración superficial de ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre en dos estaciones cantábricas rurales, la gallega B2-Louseiras y la asturiana de Niembro. Las series incluyen los cuatro días centrales del episodio nº 20 (09-15 Julio 2005), muestran la similitud en los valores de ozono y el aumento progresivo de las concentraciones de SO<sub>2</sub> a medida que se desarrolla el episodio. Los valores de NO<sub>2</sub> no experimentan cambios significativos. Los picos de SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> simultáneos registrados en B2-Louseiras al final del episodio son achacables al cambio de dirección de viento hacia el SO, de forma que esta estación recibe la influencia de instalaciones industriales gallegas próximas, situadas al SO de dicha estación”

#### Origen peninsular-mesetario

El episodio nº 26 (13-26 Julio de 2006) se ha clasificado dentro de los episodios de origen externo, causado en este caso por el transporte regional de precursores y ozono desde el centro peninsular, a pesar de la notable contribución de la generación fotoquímica en el noroeste peninsular. Este período también registró a nivel europeo los niveles más elevados de ozono del año 2006 (European Environment Agency, 2007), coincidiendo con el establecimiento de una gran área anticiclónica sobre Europa, que provocó una ola de calor en la que se alcanzaron las temperaturas más altas de todo el año, siendo incluso el mes de Julio más cálido desde que existen medidas oficiales en algunos países, como en el Reino Unido (Targa, 2006). Esta situación se desarrolló en la mayor parte del continente europeo entre el 17 y 26 de Julio, aunque en la península Ibérica y el oeste de Francia las mayores concentraciones de ozono se registraron durante la primera mitad de Junio, entre el 13 y el 18 de Julio, coincidiendo con la entrada de las altas presiones que se desplazaron posteriormente hacia Centroeuropa y el Mediterráneo oriental.

La situación sinóptica durante este período viene marcada por la entrada y reforzamiento progresivo del anticiclón de las Azores, cuyo centro va ascendiendo en latitud hasta situarse sobre el mar del Norte el día 17 (figura 3.129). Este desplazamiento hacia el nordeste del centro del área de altas presiones va acompañado de un aumento del área anticiclónica, que se extiende desde las Azores hasta los países nórdicos y el este de Europa, conformando un gran anticiclón de bloqueo sobre toda Europa, que se interrumpe temporalmente durante los días 23 y 24 de Julio. La península Ibérica también quedó bajo la influencia del anticiclón a partir del día 13, con circulación de componente Este, que se mantuvo hasta el día 18, debido al aumento de la inestabilidad provocado por el acercamiento de un centro de bajas presiones desde el Atlántico. El alejamiento del centro de altas presiones hacia latitudes más septentrionales provocó el debilitamiento progresivo del forzamiento sinóptico sobre la península, favorecido por el establecimiento de la clásica baja térmica en el interior peninsular. En realidad, las condiciones sinópticas son muy semejantes a las presentes en el episodio

previo (episodio nº 20, del 9-15 de Julio de 2005), aunque en este caso el gradiente barométrico sobre el norte peninsular es más débil, debido a la situación ligeramente más al norte del centro de altas presiones y a la mayor estabilidad en altura.

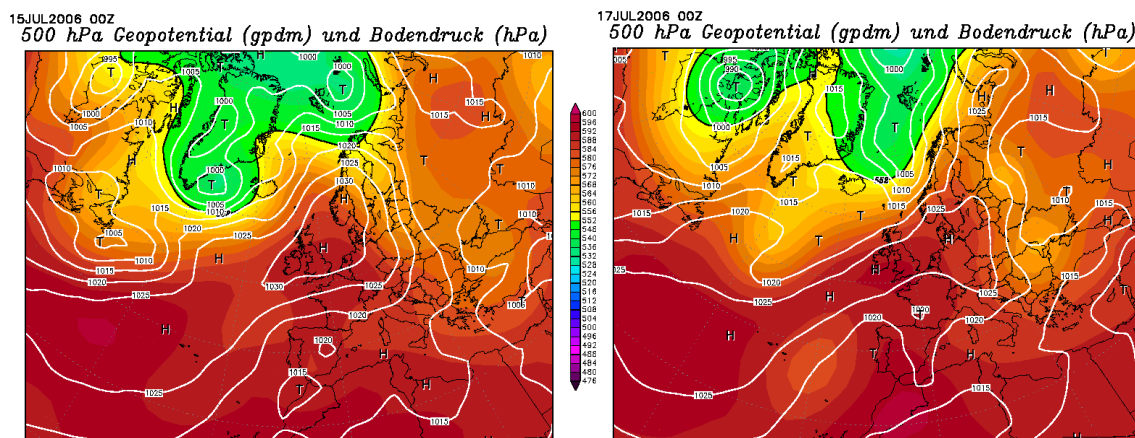


Figura 3.129: “Mapas sinópticos de superficie y a 500 hPa (reanálisis NCEP) mostrando los campos de presión superficial y altura del geopotencial a 500 hPa para los días 15 y 17 de Julio de 2006, jornadas centrales del episodio nº 26 (13 - 26 Julio de 2006), destacando el gran área anticiclónica sobre el continente europeo y la débil circulación de componente E sobre la península. Nótese la similitud con la situación sinóptica característica del episodio nº 20 (09 - 15 Julio de 2005), reflejada en la figura 3.122”

Los niveles de ozono de las estaciones españolas consideradas registran un incremento suave pero continuo hasta la jornada 17, correlacionado con la entrada y establecimiento de las condiciones anticiclónicas sobre la península Ibérica (figura 3.130, arriba). Las estaciones interiores de O Saviñao y Peñausende muestran un comportamiento similar durante todo el período, con concentraciones semejantes de ozono troposférico, sobre todo el día 17 en que se alcanza el máximo episódico en ambas, existiendo cierta coincidencia de trayectorias en O Saviñao y Peñausende en los días 16 y 17. La estación cantábrica de Niembro, a pesar de presentar un aumento continuo de ozono, mantiene valores relativamente bajos de ozono, sobre un 20% inferiores a las estaciones interiores citadas. Sin embargo, esta estación experimenta una fuerte subida de la concentración el día 17, superando notablemente los máximos de las estaciones interiores y alcanzando su máximo anual, sobre  $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este aumento tan brusco registrado en la estación de Niembro, que conduce al citado máximo del día 17, parece estar relacionado con un cambio del origen de las masas de aire (no mostrado), cuya trayectoria pasa por el valle del Ebro en las jornadas previas, mientras el día 17 presenta un recorrido más meridional sobre la submeseta Norte, atravesando un área con altos niveles de emisión de óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ , la región leonesa, con una importante concentración de centrales térmicas. Los aumentos registrados en los niveles de dióxido de azufre  $\text{SO}_2$  la tarde del día 17 son otro indicio a favor de esta hipótesis, al igual que la ausencia de cambios importantes en los registros meteorológicos de temperatura y radiación, semejantes a las jornadas previas (no mostrado). Las estaciones del norte de Galicia (B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda) presentan un patrón intermedio entre las estaciones interiores, con un perfil ascendente pero suave durante los primeros días y concentraciones similares a las obtenidos en O Saviñao y Peñausende, y un incremento más pronunciado durante la jornada 17 (como en la estación de Niembro, aunque más suave), alcanzando valores máximos similares a ésta, al menos en B2-Louseiras, y superiores al resto de estaciones nacionales consideradas. Sin embargo, aunque también se produce un cambio de trayectoria, con una procedencia más meridional el día 17, el ascenso en las estaciones del norte de Galicia es más gradual, comenzando el día 16, así que su relación con el cambio del origen de las masas de aire no está tan claro. Por otra parte, el día 17 también tiene lugar un repunte térmico en el norte de Galicia, con unos  $3^\circ\text{C}$  de ascenso en las temperaturas máximas, lo cual puede favorecer la generación fotoquímica local en estas estaciones.

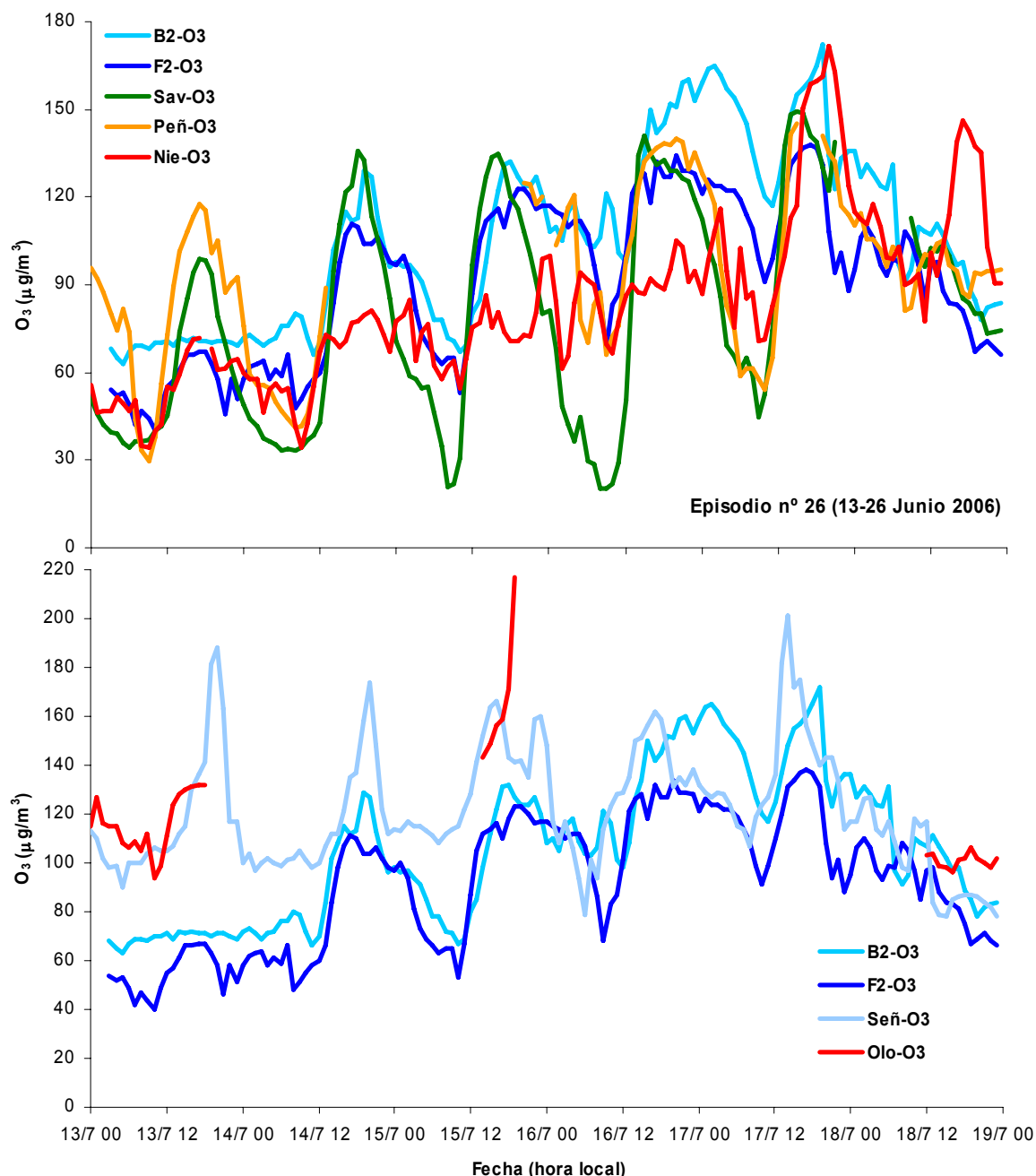


Figura 3.130: “Comparación de las series temporales de concentración superficial de ozono en estaciones gallegas septentrionales próximas a la costa (B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda) frente a las estaciones EMEP del noroeste peninsular, como la estación asturiana de Niembro, la zamorana de Peñausende y la lucense de O Saviñao (arriba), y las estaciones rurales del norte de Portugal, como Senhora do Minho y Lamas de Olo (abajo). Las series incluyen los seis días centrales del episodio nº 26 (13-26 Julio 2006), destacando el aumento brusco de la inmisión de ozono que se produce en las estaciones litorales el día 17, y el fenómeno de ascenso continuado de la inmisión de ozono a lo largo de todo el episodio, común para todas las estaciones consideradas”

La estación de Senhora do Minho (figura 3.130, abajo), en la costa norte de Portugal, recoge concentraciones de ozono sensiblemente superiores a las estaciones españolas durante este episodio, salvo el día 16, y también muestra el citado aumento brusco el día 17, a semejanza de las estaciones costeras peninsulares (B2-Louseiras y Niembro). Este incremento del día 17 en la costa norte de Portugal también va asociado a un cambio de trayectoria (no mostrado), inicialmente procedente de Levante y del centro peninsular; el día 17 las masas de aire ascienden directamente por la costa portuguesa desde Porto, lo cual puede ser un claro causante del aumento de inmisión, como se observó en otros episodios considerados de origen

portugués, del tipo del episodio nº 11, ya que tampoco se observan cambios meteorológicos significativos y sí se observa un incremento en los registros de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$  durante ese día. La estación interior de Lamas de Olo, también en el norte de Portugal, a pesar del porcentaje de datos válidos, ofrece indicios de niveles de ozono muy superiores a todas las demás estaciones, siguiendo un comportamiento clásico en esta estación durante los períodos con altos niveles de ozono, ya observado en otros episodios.

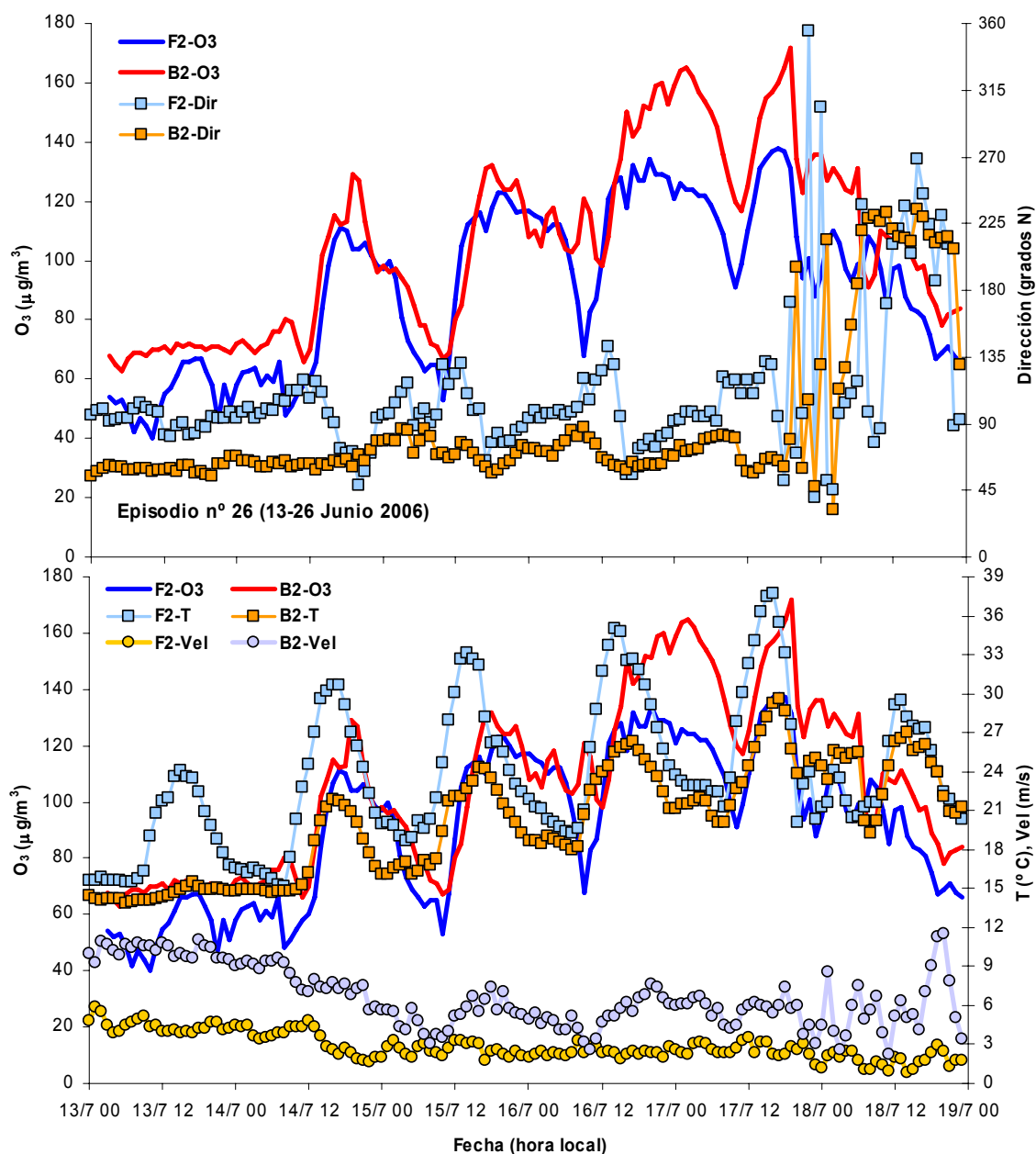


Figura 3.131: “Series temporales de dirección de viento a 10 m (arriba) y de temperatura superficial a 2 m y velocidad de viento a 10 m (abajo) frente a concentración de ozono para las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, durante las seis jornadas centrales del episodios nº 26 (13-26 Junio de 2006). Destacan los importantes registros térmicos alcanzados, tanto en las temperaturas máximas como en las mínimas, y la falta de fenómenos locales de viento, a pesar de las altas temperaturas y la intensidad de viento, no demasiado elevada”

La meteorología durante el episodio se caracteriza por la elevadas temperaturas que se midieron en las estaciones gallegas analizadas entre los días 13 y 17 de Julio (figura 3.131, abajo), fruto de la ola de calor que afectó a toda la Comunidad Gallega y el norte de Portugal:

el día 17, que fue el más caluroso del período, estaciones como F2-Fraga Redonda y B1-A Magdalena en A Coruña, y Senhora de Minho en el litoral portugués, registraron máximas superiores a 37 °C, mientras que las mínimas durante esa madrugada no disminuyeron por debajo de los 20 °C en las estaciones más próximas a la costa, como B2, F2, G2, Senhora de Minho, etc. Sin embargo, esta ola de calor fue más suave en el litoral cantábrico, pues los registros térmicos en la estación asturiana de Niembro, a pesar de aumentar progresivamente, no llegan a superar ninguna jornada los 25 °C. La estación B2-Louseiras, por sus características topográficas (altitud y exposición a los vientos del nordeste), también registra valores máximos diurnos sensiblemente menores, pero aún así elevados para sus registros habituales, con un máximo de 30 °C el día 17. A partir del día 18, la entrada de nieblas provocada por el cambio de viento a componente oeste conllevó una bajada notable de las temperaturas máximas, poniendo fin a la primera parte del episodio.

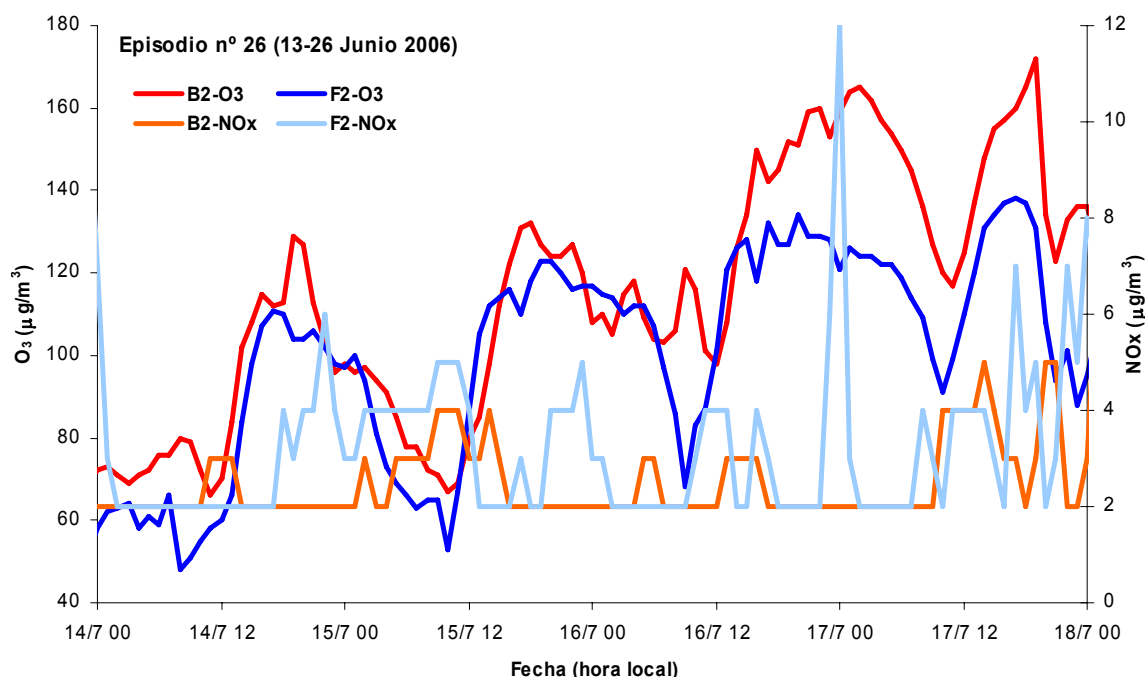


Figura 3.132: “Series temporales de concentración de ozono y NOx para las estaciones B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, durante las cuatro jornadas centrales del episodio nº 26 (13-26 Junio de 2006). Es notable la inmisión superior de ozono en B2 durante los días 16 y 17, y las mayores concentraciones de NOx registradas en F2 durante las tardes. La persistencia nocturna, superior en B2, también favorece que se alcancen mayores niveles de ozono en dicha estación”

Estas altas temperaturas, junto con la radiación solar asociada, favorecen la generación fotoquímica local, y por otra parte, promueven la emisión de compuestos orgánicos volátiles de naturaleza biogénica (BVOCs), con lo cual puede modificarse la magnitud de la relación NOx/VOCs, de gran importancia en la formación local y regional de ozono. Por otra parte, los registros térmicos ascienden continuamente desde el día 13 hasta el día 17, acompañados de un incremento continuo de los niveles de ozono medidos en las estaciones, lo cual puede ser indicativo de un aumento de la formación fotoquímica local. A su vez, los registros de ozono nocturno muestran persistencia e incrementos puntuales importantes durante las madrugadas de los días 16 y 17 en estaciones como F2 y B2, asociados a las notables temperaturas nocturnas que dificultan la formación de la capa estable nocturna; esta circunstancia es indicativa de la existencia de niveles elevados de ozono en estratos superiores, y más acusada en B2 que en F2. De acuerdo con estos datos, la formación autóctona de ozono puede tener una importante influencia en este episodio, a pesar de considerar el transporte regional como su causa principal. Aún así, existen importantes diferencias entre los valores de ozono medidos en B2-Louseiras y F2-Fraga Redonda, mayores en la primera, al contrario que la temperatura máxima, sistemáticamente inferior en B2, alrededor de 9 °C. Estas disparidades en la inmisión de ozono en ambas estaciones durante los días 16 y 17 no pueden ser achacables únicamente



a la generación local, pues la temperatura es mayor en F2, y las diferencias en los registros de  $\text{NO}_x$  y  $\text{NO}_2$  entre ambas estaciones no parecen ser suficientes para justificarlas, aunque existe un mayor nivel de  $\text{NO}_x$  en F2 durante las tardes, probablemente por aporte de la central térmica próxima (va acompañado de niveles elevados de  $\text{SO}_2$ ), que no es consumido totalmente, quizá por falta de VOCs (figura 3.132).

Los registros de viento a 2 m indican componente Este en las estaciones gallegas (figura 3.131, arriba), oscilando entre el noreste y el sureste en función de las estaciones consideradas. En la estación de A Mourela a 80 m la dirección es semejante, con viento del E-SE más intenso durante el día, oscilando entre 6-8 m/s, y la dirección coincide con los radiosondeos lanzados sobre la ciudad de A Coruña. El cambio de dirección de viento a componente Oeste se produce el día 18, debido al aumento de la inestabilidad provocado por la entrada de un centro de bajas presiones de carácter débil. A pesar de las altas temperaturas registradas no se observan vientos locales, como brisas marinas o vientos de valle-montaña, habituales en otros episodios, y que favorecen la recirculación de masas de aire. La causa más probable es que la intensidad de viento, aún siendo floja, no es suficientemente débil para permitir el establecimiento de estos regímenes locales (por ejemplo, nunca baja de 4 m/s en B2 y de 2 m/s en F2), al no producirse calmas. Por tanto, la dirección de viento está marcada por la configuración sinóptica, lo cual es propicio para los fenómenos de transporte regional de masas de aire.

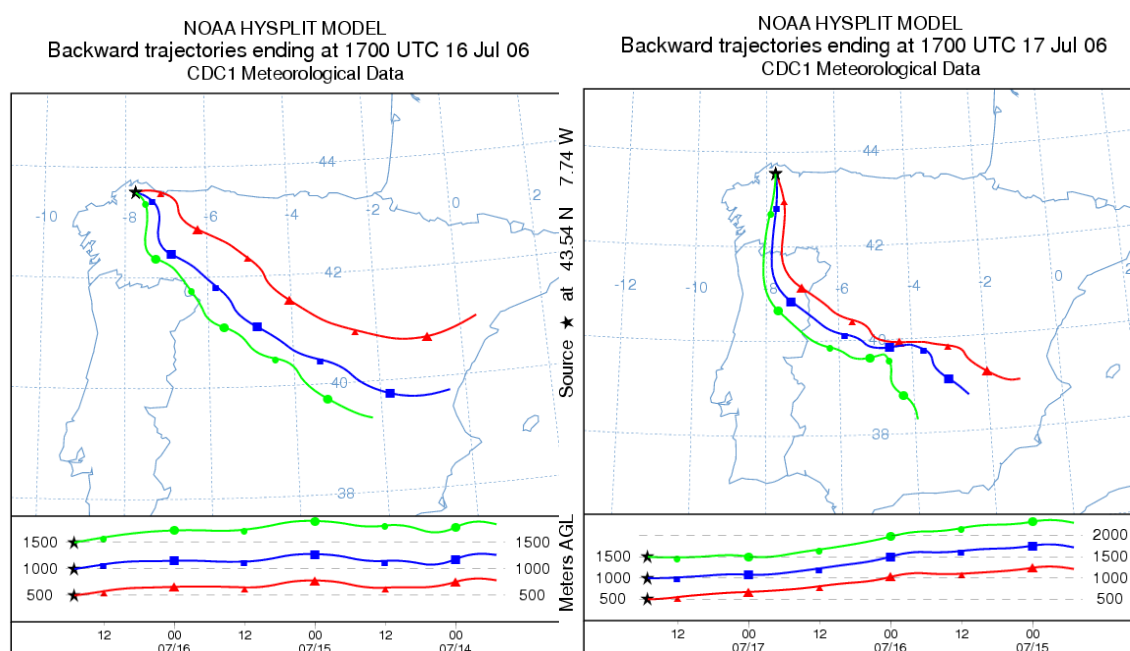


Figura 3.133: “Retrotrayectorias seguidas por las masas de aire en las 72 horas previas al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 16 (izquierda) y al registro de la inmisión máxima horaria durante el día 17 (derecha), que coincide con el máximo horario del episodio nº 26 (13-26 Julio de 2006). Las trayectorias finalizan en la estación B2-Louseiras a tres alturas diferentes: 500 m (línea roja), 1000 m (línea azul) y 1500 m (línea verde). Destaca el recorrido continuo desde el este peninsular, en las cercanías de la costa mediterránea, hasta el noroeste peninsular, atravesando la Meseta castellana en dirección noroeste por áreas con emisiones elevadas de  $\text{NO}_x$ , como las provincias de León y Madrid”

Las retrotrayectorias simuladas para los días centrales del episodio muestran una dirección concordante con las observaciones realizadas en las estaciones gallegas, con un flujo continuo del sureste desde el día 13 hasta el 16, mientras el día 17 las masas de aire provienen del sur, atravesando la zona norte del interior de Portugal (figura 3.133). Estas trayectorias se inician en el interior peninsular, en las proximidades de la costa mediterránea, cruzando la península Ibérica en dirección noroeste hasta entrar en Galicia por el borde sudoriental, por Ourense y el sur de Lugo. Los recorridos pasan por la vertical de dos zonas con una elevada emisión de precursores fotoquímicos de ozono, como son el área metropolitana de Madrid y el noroeste de Castilla-León, con un notable número de centrales térmicas de carbón emplazadas en un

territorio relativamente poco extenso, que rodea a las ciudades de Ponferrada y León. Otro factor que contribuye a potenciar el impacto del transporte de precursores y ozono troposférico desde áreas alejadas es la importante permanencia de las masas de aire sobre la península Ibérica, ya que los recorridos efectuados por las masas de aire son relativamente cortos, lo que supone un estancamiento de los estratos atmosféricos, con una renovación limitada de los mismos, debido a la estabilidad anticiclónica dominante.

El análisis de las predicciones de calidad de aire para Europa no es concluyente, pero sí permite observar el aumento continuo de los niveles de ozono peninsular a lo largo del episodio (figura 3.134), hasta alcanzar los máximos registros octohorarios en el tercio norte y la costa portuguesa. En el caso de la Comunidad Gallega, el aumento de inmisión tiene lugar desde el interior: la franja costera es la última parte del territorio en alcanzar los máximos, que se elevan previamente en el interior de Galicia y en el norte de Castilla-León, lo cual apunta hacia el transporte regional desde la Meseta como una de las causas principales del episodio nº 26.

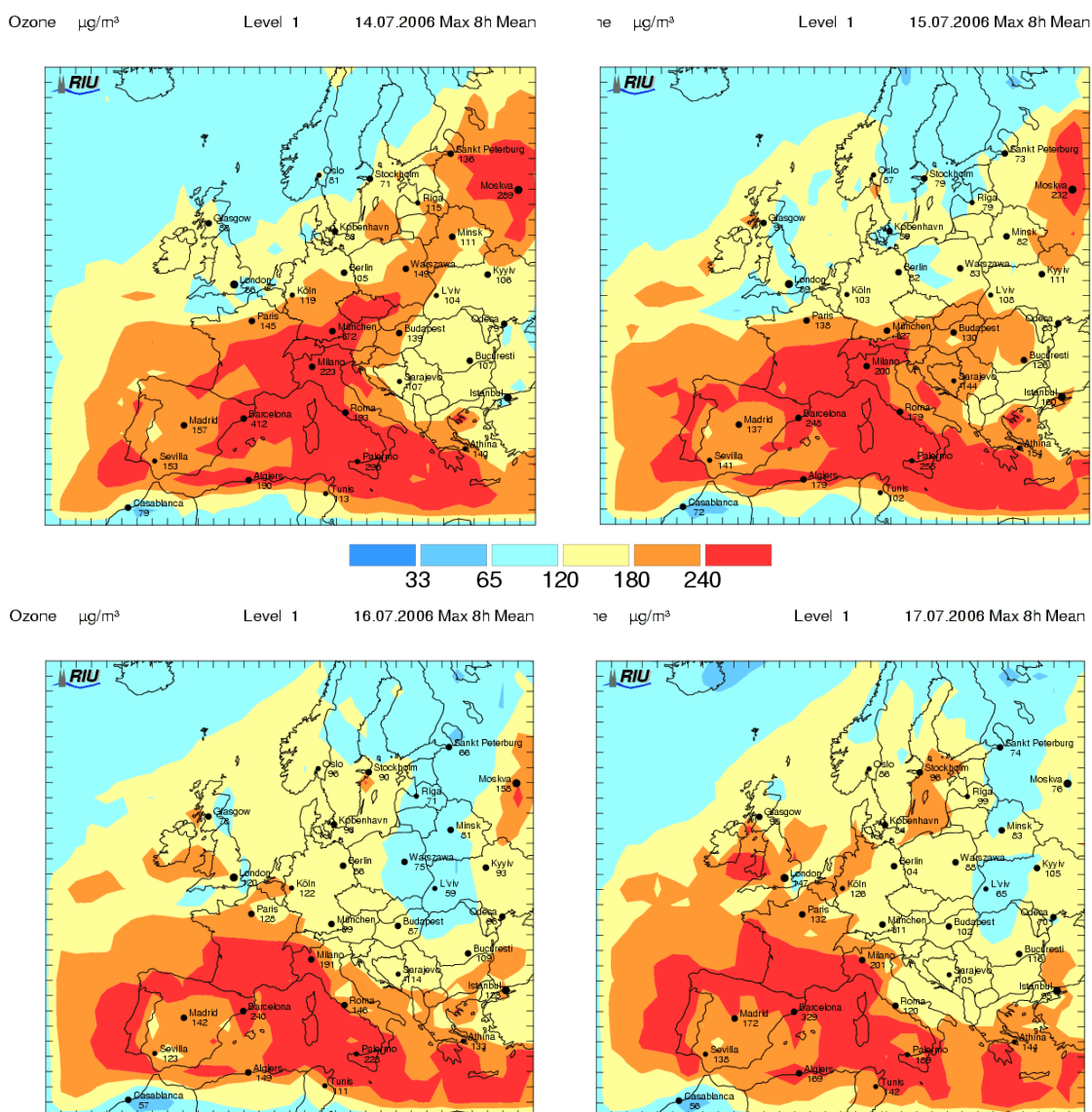


Figura 3.134: “Predicciones de calidad del aire (máximo octohorario de  $\text{O}_3$ ) sobre Europa occidental realizadas por el modelo EURAD para los días 14-17/07/2006, mostrando el incremento progresivo de los niveles de ozono en el noroeste peninsular”



La generación fotoquímica local también es muy relevante durante este episodio, dadas las condiciones meteorológicas dominantes, con una ola de calor afectando al norte de España y bajas intensidades de viento, que impiden la renovación y limpieza de las masas de aire. La dirección de viento E-SE característica de los episodios de origen peninsular está asociada a bajas intensidades de viento y temperaturas muy elevadas, al aportar aire cálido y seco procedente del interior; debido a ello, los niveles de inmisión de ozono durante este tipo de episodios, junto con los de origen portugués, presentan una importante influencia de la formación local, ya que la meteorología asociada es altamente propicia para ello.

Por tanto, se ha establecido que la causa principal de la magnitud de los registros de ozono durante el episodio nº 26 es el transporte regional de ozono y precursores nitrogenados desde el interior peninsular, destacando áreas como el área urbana de Madrid y las grandes instalaciones industriales situadas en tierras leonesas. Aún así, la generación fotoquímica local, a partir de contaminantes primarios emitidos en la propia Comunidad Autónoma de Galicia desempeña un papel fundamental en el desarrollo de este episodio.

## CONCLUSIONES

---

### 4.1 Conclusiones

Se enumeran a continuación las principales conclusiones derivadas de este trabajo de investigación, relativo al estudio de los niveles de ozono en el noroeste gallego durante el período comprendido entre los meses de Enero de 2002 y Agosto de 2007:

- a) La concentración media anual de inmisión de ozono en el noroeste de Galicia no muestra una tendencia estadísticamente significativa, aunque se aprecian indicios de disminución de los percentiles medios (percentil 50) y de los valores máximos (percentil 98). Esta situación no concuerda con las tendencias observadas en el norte de Europa (De Leeuw, 2000), que indican una ligera subida de los percentiles medios y una bajada significativa de los valores pico
- b) La variación de la concentración estacional registrada durante este período en las estaciones rurales del noroeste gallego se corresponde claramente con el modelo citado para las costas atlánticas europeas (Scheel et al., 1997; Monks, 2000), con un máximo primaveral absoluto y un máximo estival secundario.
- c) Se han identificado treinta y dos períodos con elevados niveles de ozono troposférico en el noroeste de Galicia entre los meses de Julio de 2002 y Agosto de 2007, a partir de los datos de cinco estaciones pertenecientes a la Red de Estaciones de Vigilancia Atmosférica de la U.P.T As Pontes. Veintidós de estos episodios presentaban concentraciones horarias de inmisión superiores a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- d) La mayoría de estos episodios de inmisión de ozono troposférico se desarrollan bajo condiciones sinópticas anticiclónicas, caracterizadas por centros de altas presiones situados al norte de la península Ibérica, sobre las Islas Británicas o Europa Central, y una dorsal en altura que atraviesa la península Ibérica desde el norte de África. Este anticiclón Británico-Centroeuropo causa circulación de componente Este sobre el noroeste peninsular, que se traduce en vientos flojos del Este o Sureste, y temperaturas muy elevadas, sobre todo en período estival. En un número importante de episodios la componente Este rola ligeramente hacia el Sur, originando vientos del S-SE debido al establecimiento de una baja térmica sobre el centro peninsular o bien a causa del acercamiento de depresiones poco intensas desde el oeste de las costas portuguesas.
- e) El 75% de los episodios se encuadran dentro de tres configuraciones sinópticas características: “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”, “Pantano barométrico” y “Vaguada ibero-africana”, caracterizadas por el predominio de la masa de aire continental tropical durante el período estival. Estos tres patrones sinópticos son los que causan los registros máximos de ozono más elevados en la zona de estudio, destacando la configuración de “Altas presiones sobre el Atlántico y Europa”.
- f) Las principales trayectorias de las masas de aire que se asocian a los episodios analizados son aquellas que provienen de Portugal o el Atlántico Sur, las que tienen su origen en la región mediterránea o el centro peninsular, las de origen local y finalmente las caracterizadas por su recirculación sobre el noroeste peninsular
- g) En cuanto a la evolución de las concentraciones de ozono, se han observado dos tipos de episodios: un conjunto de carácter puntual, de escasa duración, y asociados

preferentemente a la generación fotoquímica local, y otro grupo de carácter progresivo, con una duración superior a las 24 horas, y que muestran una mayor influencia del transporte de ozono desde áreas fuente exteriores a Galicia.

- h) Un considerable número de episodios, caracterizados por la circulación sinóptica de componente Este, muestran una influencia destacada de la recirculación diurna de masas de aire, bien representada por simulaciones meteorológicas de alta resolución (Saavedra et al., 2007). Esta recirculación local es causada por el establecimiento de brisas marinas en superficie, opuestas a la débil circulación sinóptica en altura. En consecuencia, el ozono generado en las costas atlánticas y el ozono transportado desde regiones situadas al este se mantienen sobre el área de estudio, incrementándose progresivamente los niveles de ozono a lo largo de los días.
- i) Sin embargo, la aportación externa de ozono también afecta en ocasiones a los máximos de ozono registrados en el noroeste de Galicia, con varios episodios en los que la variación de las concentraciones diarias viene marcada por la presencia frecuente de máximos diarios de ozono producidos durante la noche. Estos máximos de carácter nocturno se asocian a inyecciones de aire desde capas superiores enriquecidas en ozono, debido a la inestabilidad dinámica en la capa límite estable nocturna causada, en muchos casos, por vientos orográficos.
- j) La clasificación de episodios según su origen indica que un 27% se pueden considerar de tipo estrictamente autóctono o local, derivados de la generación fotoquímica de ozono a partir de precursores emitidos en el área de medida o zonas próximas a ésta, incluyendo como tal la totalidad de Galicia; otro 27% son episodios de carácter alóctono, debidos principalmente al transporte de ozono desde regiones limítrofes más o menos alejadas (incluso con posible contribución de ozono continental). El 46% de episodios restantes se asocian a una influencia mixta, en la que predomina la generación local, pero existe una importante contribución del transporte de ozono desde áreas alejadas.
- k) Se han propuesto tres zonas destacadas como fuentes potenciales de transporte de ozono hacia el noroeste peninsular, con efectos notables sobre los niveles de ozono registrados en las estaciones analizadas:
  - Meseta Norte peninsular, que presenta un notable conjunto de industrias de combustión, destacando las centrales térmicas de carbón ubicadas en la provincia de León. Se ha estimado que un 37% de los episodios de carácter alóctono muestran contribuciones de ozono procedente de esta zona.
  - Sur de Galicia, siendo Portugal la principal área fuente de ozono, debido a los altos niveles que se suelen registrar durante el verano en la región norte y en el litoral atlántico. En términos de episodios, se establece que el transporte de ozono desde la costa atlántica peninsular afecta a un 37% de los episodios con influencia externa, coincidiendo en importancia con la Meseta castellana.
  - Costa cantábrica, cuyo aporte de ozono se ve favorecido por la dirección E-NE del viento predominante en Galicia durante las estaciones de primavera y verano, además de albergar importantes núcleos industriales, tanto en el País Vasco como en áreas litorales de Asturias. En estos casos, las retrotrayectorias indican también un posible aporte de Europa Central. La contribución al número de episodios de esta área fuente es ligeramente menor que en los dos casos anteriores, siendo responsable de la llegada de ozono externo en un 25% de los mismos.

## **4.2 Trabajo futuro**

Este estudio puede considerarse un avance significativo en el conocimiento de la situación de la contaminación por ozono en el noroeste de Galicia, siendo algunos resultados extensibles al noroeste peninsular, dadas las similitudes geográficas y climáticas que presenta la región.

A partir de este estudio surgen otras cuestiones y oportunidades que pueden ser objeto de investigaciones posteriores, como son:

- a) A escala sinóptica, una clasificación automatizada de situaciones sinópticas asociadas a altos niveles de ozono en el noroeste peninsular, mediante métodos como el análisis de componentes principales y su agregación por conjuntos, que disminuya el grado de subjetividad de la clasificación sinóptica manual empleada en este trabajo.
- b) A escala regional, el estudio comparativo con áreas de situación geográfica y orografía semejante, como puede ser el norte de Portugal, que permita establecer la posible influencia de la generación fotoquímica en Galicia sobre los registros de ozono troposférico medidos en Portugal, y viceversa.
- c) A escala local y regional, el estudio de las concentraciones de ozono en altura, mediante sondas de ozono y a través de simulaciones de calidad de aire, que contribuyan a disminuir la incertidumbre sobre el origen de algunos episodios y a profundizar en el conocimiento de procesos relevantes identificados en este trabajo como
  - i. a escala regional, obtención de la contribución cuantitativa de las regiones próximas en determinados episodios
  - ii. a escala local, las recirculaciones locales (brisas marinas y de valle-montaña) o la existencia de máximos absolutos durante la noche.

Cualquiera de estos posibles estudios, y otros posteriores relacionados, deberían sacar ventaja de la aplicación de técnicas de simulación de calidad de aire, para cuya correcta aplicación resulta, al mismo tiempo, imprescindible el análisis de episodios desarrollado en este trabajo.

Estas técnicas permitirían una cuantificación del origen de los episodios de ozono troposférico, confirmando así las hipótesis formuladas sobre dicho origen, mediante el uso de técnicas como:

- a) La segregación de focos emisores de precursores de ozono, en función de su ubicación geográfica o naturaleza, con el fin de establecer las estrategias de control idóneas.
- b) La cuantificación de la aportación de distintas reacciones fotoquímicas a la generación de ozono troposférico, lo que permitiría determinar la importancia de los distintos precursores implicados.
- c) La evaluación de la sensibilidad del ozono troposférico a distintos parámetros meteorológicos en la región, que puede explicar la variabilidad anual de los episodios de ozono en la región, no derivada de los cambios en las emisiones de precursores.

Estos y otros análisis cuantitativos resultarán de gran utilidad para confirmar las conclusiones derivadas de este trabajo de investigación sobre los episodios de ozono troposférico en Galicia.



## CONCLUSIONS

---

### 4.1 Conclusions.

In this research work a comprehensive methodology for the analysis of meteorological and air quality data (both simulated and observed) related to the occurrence of tropospheric ozone episodes was established.

This methodology was applied to the ozone episodes observed in rural areas of northwest Galicia (period 2002-2007). From this analysis, the following conclusions were achieved,

- a) The annual mean ground level concentration of ozone in northwestern Galicia does not show a statistically significant trend, although there are signs of declining average percentiles (50<sup>th</sup> percentile) and maximum values (98<sup>th</sup> percentile). This situation is not consistent with trends observed in northern Europe (De Leeuw, 2000), where a slight rise in average percentiles and a significant lowering of the peak values are observed.
- b) The seasonal variation in levels recorded during this period in the northwestern Galician rural stations closely corresponds to the typical behaviour in the European atlantic coasts (Scheel et al., 1997; Monks, 2000), with a absolute spring maximum and a secondary summer maximum.
- c) Thirty-two periods with high levels of tropospheric ozone have been identified in northwestern Galicia from July 2002 to August 2007, based on data from five stations belonging to the network of atmospheric monitoring stations of the UPT As Pontes. Twenty-two episodes showed hourly ground level concentrations exceeding 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- d) Most of these episodes of tropospheric ozone were developed under anticyclonic synoptic conditions characterized by high pressure centers located at north of the Iberian Peninsula, on the British Isles and Central Europe, and by a ridge crossing the Iberian Peninsula from North Africa. This British anticyclone causes easterly flow over the northwest area, resulting in light easterly and southeasterly winds, and very high temperatures, especially in the summer. In a remarkable number of episodes, the east component moves slightly to the south, resulting in S-SE winds due to the thermal low setting on the peninsular center or because of some less intense lows approaching since the western Portuguese coast.
- e) 75% of cases fall within three typical synoptic patterns: "High pressure over the Atlantic and Europe," "Barometric swamp" and "Ibero-African trough", characterized by the dominance of the tropical continental air mass during the summer period. These three synoptic patterns are causing maximum ozone records higher in the study area, highlighting the setting of "High pressure over the Atlantic and Europe".
- f) The main trajectories of air masses associated with the episodes analyzed are a) those from Portugal and the South Atlantic, b) other paths with their origin in the Mediterranean region or in the center of the peninsula, c) local source and, finally, d) those trajectories characterized by recirculation on the northwest of the Iberian peninsula.
- g) Regarding the evolution of ozone concentrations, two types of events were observed: a set of occasional, short-lived peaks, and preferentially associated to local photochemical generation, and another group of progressive increment, with a duration exceeding 24 hours, showing a greater influence of ozone transport from source areas outside Galicia.

- h) In episodes with a eastern synoptic component a phenomena of local recycling during daytime was well represented by high resolution meteorological simulations (Saavedra et al., 2007). This local recycling cell is produced by the diurnal sea breeze (surface), opposite to the soft synoptic wind (aloft). As a consequence, the ozone produced at the western coast (surface) and transported from eastern regions (aloft) keep in the local area, which increases the ozone levels during daytime.
- i) However, external ozone apportioning also has an influence in occasional ozone peaks: in northwestern Galician ozone episodes that the variation of daily concentrations is marked by the common occurrence of relative surface ozone maxima produced during the night. These nocturnal maxima are associated with air injections from higher layers rich in ozone (usually, transported), due to dynamic instability in the stable nocturnal boundary layer caused in many cases by orographic winds.
- j) From this comprehensive analysis, the classification of episodes according to their origin indicates that 27% can be considered of a strictly local type, arising from the photochemical ozone generation from precursors emitted in this region, including as such Galicia; another 27% are episodes of allochthonous nature, primarily due to carry of ozone from surrounding regions (even with possible contribution of continental ozone). The remaining 46% of episodes are associated with a mixed influence, which is dominated by local generation, but with a significant contribution of ozone and photochemical precursors transport from remote areas.
- k) About the surrounding areas that contribute to the ozone levels in the northwestern Spain (Galicia), three highlighted areas have been proposed, with significant effects on ozone levels recorded at the rural stations considered,
  - North of the Peninsular Plateau, which has a remarkable set of fossil fuel power plants, highlighting the coal power plants located in the province of Leon. It has been estimated that 37% of episodes of allochthonous nature show ozone contributions from this area.
  - South of Galicia, being the North of Portugal the main source area of ozone, due to high levels usually recorded in summer in its northern region and its Atlantic coast. In terms of events, transport of ozone from the peninsular Atlantic coast affects 37% of episodes with outside influence, which is the same contribution as the Peninsular Plateau.
  - Cantabric coast, whose contribution of ozone is favoured by the E-NE direction of the prevailing wind in Galicia during the spring and summer, as well as hosting major industrial centres, both in the Basque Country and coastal areas of Asturias; however, in this case the backward trajectories show a possible contribution from central Europe. The contribution to ozone episodes of this source area is slightly smaller than in the previous two cases, being responsible for the arrival of external ozone by 25% of them.

## **4.2 Future work.**

This study can be considered a new and significant advance in understanding the situation of ozone pollution in northwestern Galicia, with some results extensible to the northwest Peninsula, because of the geographic and climatic similarities in the region.

As in any original research work, new questions arise that produce other issues and opportunities to be subject to further investigation, such as:

- a) At synoptic scale, after the experience in the application of the qualitative Font Tullot classification, the development of a statistical classification of synoptic conditions associated with high levels of ozone in the northwestern Iberian Peninsula, by methods such as principal component analysis and clustering, should allow to reduce the degree of subjectivity of the synoptic classification used in this work.



- b) At regional scale, a comparative study with areas of similar geographical location and topography, such as northern Portugal, in order to establish the possible influence of photochemical generation in Galicia, from the records of tropospheric ozone measured in Portugal, and vice versa.
- c) At local and regional scale, study of the aloft ozone dynamics, by means of both measurements (rawinsondes) and air quality simulations, should reduce the uncertainty about the origin of certain episodes and deeper understanding of relevant processes identified in this work, such as,
  - i. At regional scale, the quantitative contribution of surrounding regions can be obtained for singular episodes.
  - ii. At local scale, some phenomena as local ozone recycling (sea breezes, mountain-valley breezes) and the singular occurrence of absolute ozone maxima at nighttime, can be explained.

In fact, any of these potential studies, and later related, should take advantage of the air quality simulation techniques. Because these techniques allow the quantification of the apportioning of different processes and regions to the tropospheric ozone levels, it can be applied to specific episodes in order to confirm some of the assumptions established in this work. About this application of air quality modelling, some examples are,

- a) Segregation of emission sources of ozone precursors, depending on its location or nature, in order to establish suitable control strategies.
- b) Quantification of the contribution of different photochemical reactions to the generation of tropospheric ozone, which would determine the importance of the various precursors involved.
- c) Sensitivity analysis of tropospheric ozone on different meteorological parameters in the region, which may explain the annual variability of ozone episodes in the area, not derived from changes in the emissions of precursors, as  $\text{NO}_x$ .

These and other quantitative analysis will prove very useful to confirm and complete the conclusions of this research on tropospheric ozone episodes in Galicia.



## BIBLIOGRAFÍA

---

Abdul-Wahab, S.A., Al-Alawi, S.M., 2002: *Assesment and prediction of tropospheric ozone concentrations levels using artifical neural networks*, Environmental Modelling and Software, **17**, pp. 219-228.

Acero, F.J., Mateos, V.L., García, J.A., Núñez, M., 2004: *Concentraciones de ozono troposférico en Extremadura durante la ola de calor del 2003*, XXVIII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española, 11 pp.

Adame, J., Lozano, A., Bolívar, J., de la Morena, B., Contreras, J., Godoy, F., 2008: *Behavior, distribution and variability of surface ozone at an arid region in the south of Iberian Peninsula (Seville, Spain)*, Chemosphere, **70**, pp. 841-849.

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), 2002 : *Classification et critères d'implantation des stations de surveillance de la qualité de l'air*, Direction de l'Air et des Transports, Département Air, ADEME Éditions, Paris.

Agência Portuguesa do Ambiente, 2008: *A Qualidade do Ar em Portugal*. [www.qualar.org]. Acceso 25/11/09.

Albizuri, A., 2003: *La calidad del aire en relación a la contaminación por ozono en la Comunidad Autónoma del País Vasco: evaluación y gestión en aplicación de las directivas comunitarias*, 1ª Jornada Técnica sobre Contaminación Atmosférica, San Sebastián, [www.euskadi.net/r33-2288/eu/contenidos/evento/contaminacion\_atmosferica/es\_jornada/adjuntos/ponencia4.pdf]. Acceso 18/12/08.

Albizuri, A., 2004: *Clasificación de patrones meteorológicos y su relación con los episodios de ozono en la Comunidad Autónoma del País Vasco*, Proceedings of the IX Congress of Environmental Engineering, eds. Bilbao Exhibition Centre y Universidad del País Vasco, Bilbao, España, pp. 441-451.

Albizuri, A., 2005: *Classification of meteorological patterns and its relation with the ozone episodes in the Basque Country*, Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality (UAQ-2005), eds. R.S. Sokhi, M. Millán, y N. Moussiopoulos, publicados por la University of Hertfordshire (UK), pp. 100-103.

Alonso, L., Gangoiti, G., Navazo, M., Millan, M., Mantilla, E., 2000: *Transport of tropospheric ozone over the Bay of Biscay and the eastern cantabrian coast of Spain*, Journal of Applied Meteorology, **39**(4), pp. 475-486.

Amann, M., Derwent, D., Forsberg, B., Hänninen, O., Hurley, F., Krzyzanowski, M., De Leeuw, F., Liu, S.J., Mandin, C., Schneider, J., Schwarze, P., Simpson, D., 2008: *Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution*, World Meteorological Organization (WHO), Regional Office for Europe, 93 pp.

Anastassopoulos, A., Nguyen, S., Xu, X., 2004: *On the use of the HYSPLIT model to study air quality in Windsor, Ontario, Canada*, Environmental Informatics Archives, **2**, pp. 517-525.

- Andronopoulos, S., Passamichali, A., Gounaris, N., Bartzis, J.G., 2000 : *Evolution and transport of pollutants over a Mediterranean coastal area: the influence of biogenic volatile organic compound emissions on ozone concentrations*, Journal of Applied Meteorology, **39**(4), pp. 526–545.
- Baird, C., 2001: *Química ambiental*, ed. Reverté, Barcelona (España), pp. 622.
- Banta, R.M., Senff, C.J., Nielsen-Gammon, J., Darby, L.S., Ryerson, T.B., Sandberg, S.P., Williams, E.J., Trainer, M., 2005: *A bad air day in Houston*, Bulletin American Meteorological Society, **86**, pp. 657-669.
- Barros, N., Borrego, C., Toll, I., Soriano C., Jiménez, P., Baldasano, J.M., 2003: *Urban photochemical pollution in the Iberian Peninsula: Lisbon and Barcelona airsheds*, Journal of the Air & Waste Management Association, **53**, pp. 347-359.
- Baumann, K., Maurer, H., Rau, G., Piringer, M., Pechinger, U., Prévôt, A., Furger, M., Neiningner, B., Pellegrini, U., 2001: *The influence of south Foehn on the ozone distribution in the Alpine Rhine valley-results from the MAP field phase*, Atmospheric Environment, **35** (14), pp. 6379-6390.
- Baumbach, G., Vogt, U., 1999: *Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg*, Atmospheric Environment, **33**, pp. 4019-4027.
- Beck, J.P., Krzyzanowski, M., Koffi, B., 1998: *Tropospheric Ozone in the European Union - The consolidated report*, Topic Report nº 8/1998, European Environment Agency.
- Black, V.J., Black, C.R., Roberts, J.A., Stewart, C.A., 2000: *Impact of ozone on reproductive development of plants*, New Phytology, **147**, pp. 421-447.
- Borrego, C., Miranda, A.I., Carvalho, A.C., Fernández, C., 2000: *Climate change impact on the air quality: the portuguese case*, Global Nest: the International Journal, **2** (2), pp. 199-208.
- Bower, J., Lampert, L., Broughton, G., 2004: *Air pollution in the UK: 2003*, Reference Number Netcen/ED45098/Issue 1, AEA Technology Environment, National Environmental Technology Centre.
- Bower, J., Lampert, L., Broughton, G., 2005: *Air pollution in the UK: 2004*, Reference Number Netcen/ED48692008/Issue 1, AEA Technology Environment, National Environmental Technology Centre.
- Bower, J., Lampert, L., Broughton, G., Stedman, J., Pye, S., Targa, J., Kent, A., Grice, S., 2006: *Air pollution in the UK: 2005*, Reference Number Netcen/ED48692008/Issue 1, AEA Technology Environment, National Environmental Technology Centre.
- Brasseur, G., Prinn, R.G., Pszenny, A.A.P., 2003: *Atmospheric chemistry in a changing world: an integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research: the International Global Atmospheric Chemistry Project of the International Geosphere-Biosphere Programme*, Global change-the IGBP series, ed. Berlin-Springer, pp. 73-124.
- Burrows, W.R., Benjamin, M., Beauchamp, S., Lord, E.R., McCollor, D., Thomson, B., 1995: *CART decision-tree statistical analysis and prediction of summer season maximum surface ozone for the Vancouver, Montreal and Atlantic regions of Canada*, Journal of Applied Meteorology, **34**, pp. 1848-1862.
- Caballero, S., Galindo, N., Pastor, C., Varea, M., Crespo, J., 2007: *Estimated tropospheric ozone levels on the southeast Spanish Mediterranean coast*, Atmospheric Environment, **41**, pp. 2881-2886.

Calderón-Garcidueñas, L., Rodríguez-Alcaraz, A., García, R., Ramírez, L., Barragan, G., 1995: *Nasal inflammatory responses in children exposed to a polluted urban atmosphere*, Journal of Toxicology and Environmental Health, **45**, pp. 427-437.

Capel Molina, J.J., 2000: *El clima de la península Ibérica*, Ed. Ariel, Barcelona.

Carshaw, D.G., 2005: *On the changing seasonal cycles and trends of ozone at Mace Head, Ireland*, Atmospheric Chemistry and Physics, **5**, pp. 3441-3450.

Carvalho, A.C., Carvalho, A., Gelpi, I., Barreiro, M., Borrego, C., Miranda, A.I., Pérez-Muñuzuri, V., 2006: *Influence of topography and land use on pollutants dispersion in the Atlantic coast of Iberian Peninsula mechanism model*, Atmospheric Environment, **40**, pp. 3969-3982.

Carvalho, A., Monteiro, A., Ribeiro, I., Tchepel, O., Miranda A.I., Borrego C., Saavedra, S., Souto, J.A., Casares, J.J., 2010: *High ozone levels in the northeast of Portugal: Analysis and characterization*, Atmospheric Environment, **44** (8), pp. 1020-1031.

Casares, J.J., Rodríguez, R., Maceira, P., Souto, J.A., Ramos, S., Costoya, M.A., Sáez, A., Vellón, J.M., 2005: *Inventario, análisis y proyección de las emisiones atmosféricas industriales de Galicia*, Universidade de Santiago de Compostela, 282 pp.

Castell, N., Mantilla, M., 2003: *Estudio de los episodios de contaminación por ozono en la Comunidad Valenciana*, eds. Generalitat Valenciana/Conselleria de Territori i Habitatge, Valencia.

Castell, N., Mantilla, M., Fernández, F., López, E., 2004: *Distribución espacial y temporal de los episodios de contaminación por ozono y su relación con las situaciones sinópticas en la vertiente mediterránea*, Proyectos y métodos actuales en Climatología, Asociación Española de Climatología, 2004, Serie B, **1**, pp. 600-606.

Castell, N., Mantilla, E., Millan, M., 2008: *Analysis of tropospheric ozone concentration on a Western Mediterranean site: Castellon (Spain)*, Environmental Monitoring and Assessment, **136** (1-3), pp. 3-11.

Castell, N., Mantilla, E., Salvador, R., Stein, A., Millan, M., 2009: *Photochemical model evaluation of the surface ozone impact of a power plant in a heavily industrialized area of southwestern Spain*, Journal of Environmental Management, **91** (3), pp. 662-676.

Castell, N., Mantilla, E., Stein, A., Salvador, R., Millan, M., 2009b: *A Modeling study of the impact of a power plant on ground-level ozone in relation to its location southwestern Spain as a case study*, Water, Air and Soil Pollution, doi:10.1007/s11270-009-0181-y.

Castellanos, M., Franco, A., Cartelle, D., Febrero, M., Roca, E., 2009: *Identification of NO<sub>x</sub> and ozone episodes and estimation of ozone by statistical analysis*, Water, Air and Soil Pollution, **198**, pp. 95-110.

Chevalier, A., Gheusi, F., Delmas, R., Ordoñez, C., Zarrat, C., Zbinden, R., Thouret, V., Athier, G., Cousin, J. M., 2007: *Influence of altitude on ozone levels and variability in the lower troposphere: a ground-based study for western Europe over the period 2001–2004*, Atmospheric Chemistry and Physics, **16** (7), pp. 4311-4326.

Chevener, J., Jensen, C.O., 2001: *Operational ozone forecasts for the region of Copenhagen by the Danish Meteorological Institute*, Atmospheric Environment **35**, pp. 4567-4580.

Colette, A., Ancellet, G., 2005: *Impact of vertical transport processes on the tropospheric ozone layering above Europe. Part II: Climatological analysis of the past 30 years*, Atmospheric Environment, **39**, pp. 5423-5435.

Comrie, A.C., 1992: *An enhanced synoptic climatology of ozone using a sequencing technique*, Physical Geography, **13**, pp. 53-65.

Comrie, A.C., Yarnal, B., 1992: *Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania*. Atmospheric Environment, **26B**, pp. 301-312.

Consejería de Medio Ambiente (Junta de Castilla y León), 2010: *Red de Contaminación Atmosférica*. [www.jcyl.es/jcyl/cmaot/dgca/datos\_atmosfera]. Acceso 25/12/2007.

Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible (Xunta de Galicia), 2003-2006: *Calidade do Aire en Galicia - Estadísticos 2003-2006*, ed. Laboratorio de Medio Ambiente de Galicia.

Corsmeier U., Kalthoff N., Kolle O., Kotzian M., Fiedler F., 1997: *Ozone concentration jump in the stable nocturnal boundary layer during a LLJ- event*, Atmospheric Environment, **31** (13), pp. 1977-1989.

Coyle, M., Smith, R. I., Stedman, J. R., Weston, K. J., Fowler, D., 2002: *Quantifying the spatial distribution of surface ozone concentration in the UK*, Atmospheric Environment, **36**, pp. 1013-1024.

Crutzen, P.J., 1995: *Ozone in the troposphere*, en *Composition, Chemistry, and Climate of the Atmosphere*, ed. H.B. Singh, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 349-393.

Danalatos, D., Glavas, S., 1996: *Diurnal and seasonal variations of surface ozone in a Mediterranean coastal site, Patras, Greece*, Science of The Total Environment Volume, **177** (1-3), pp. 291-301.

Danielsen, E.F., 1968: *Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity*, Journal of Atmospheric Science, **25**, pp. 502-518.

Dayan, U., Levy, I.J., 2002: *Tropospheric Ozone in Louisiana and Synoptic Circulation*, Journal of Geophysical Research, **107**, pp. 1635-1649.

De la Morena, B., Adame, J.A., Contreras, J., Lozano, A., Godoy, R., Hernández, M.A., Bolívar, J.P., 2008: *Concentraciones de ozono superficial en Andalucía: zonificación*, Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Comunicación técnica, pp. 1-29.

De Leeuw, F., 2000: *Trends in ground level ozone concentrations in European Union*, Environmental Science and Policy, **3**, pp. 189-199.

De Vries, W., Reinds, G.J., Posh, M., Sanz, M.J., Krause, G., Calatayud, V., Renaud, J.P., Dupoucy, H., Sterba, H., Vel, E.M., Dobbertin, M., Gundersen, P., Voogd, J.C.H., 2003: *Intensive Monitoring of Forest Ecosystems in Europe, 2003*, Technical Report EC-UN/ECE, Brussels, Geneva.

Derwent, R.G., Davies, T.J., 1994: *Modelling the impact of NO<sub>x</sub> or hydrocarbon control on photochemical ozone in Europe*, Atmospheric Environment, **28** (12), pp. 2039-2052.

Derwent, R.G., Simmonds, P.G., Seuring, S., Dimmer, C., 1998: *Observation and interpretation of the seasonal cycles in the surface concentrations of ozone and carbon monoxide at Mace Head, Ireland from 1990 to 1994*, Atmospheric Environment, **32** (2), pp. 145-157.

Derwent, R.G., Jenkin, M.E., Saunders, S.M., Pilling, M.J., Simmonds, P.G., Passant, N.R., Dollard, G.J., Dumitrean, P., Kent, A., 2003: *Photochemical ozone formation in north west Europe and its control*, Atmospheric Environment, **37**, pp. 983-1991.

Derwent, R.G., Stevenson, D.S., Collins, W.J., Johnson, C.E., 2004: *Intercontinental transport and the origins of the ozone observed at surface sites in Europe*, Atmospheric Environment, **38** (13), pp. 1891-1901.

Derwent, R.G., Simmonds, P.G., Manning, A.J., Spain, T.G., 2007: *Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland*, Atmospheric Environment, 2007, **41**, pp. 9091-9098.

Draxler, R.R., Hess, G.D., 1997: *Description of the Hysplit\_4 modeling system*, NOAA Tech Memo ERL ARL-224, pp. 1-27.

Draxler, R.R., Hess, G.D., 1998: *An overview of the Hysplit\_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition*, Australian Meteorological Magazine, **47**, pp. 295-308.

Draxler, R.R., 2000: *Meteorological Factors of Ozone Predictability at Houston, Texas*, Journal of Air and Waste Management Association, **50**, pp. 259-271.

Dudhia, J., 1993: *A nonhydrostatic version of the Penn State NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front*, Monthly Weather Review, **121**, pp. 1493-1513.

Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S., Carretero, J., Liger, E., 2002: *Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast*, The Science of the Total Environment, **299**, pp. 97-113.

Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S., Carretero, J., Liger, E., 2004: *Analyses of ozone in urban and rural sites in Málaga (Spain)*, Chemosphere, **56**, pp. 631-639.

Dueñas, C., Fernández, M.C., Cañete, S., Carretero, J., Liger, E., 2005: *Stochastic model to forecast ground-level ozone concentration at urban and rural areas*, Chemosphere, **61**, pp. 1379-1389.

Eder B.K., Davies, J.M., Bloomfield, P., 1994: *An automated classification scheme design to better elucidate the dependence of ozone on meteorology*, Journal of Applied Meteorology, **33**, pp. 1182-1199.

Elliasson, I., Thorsson, A., Andersson-Sköld, Y., 2003: *Summer nocturnal ozone maxima in Göteborg, Sweden*, Atmospheric Environment, **37**, pp. 2615-2627.

Entwistle, J., Weston, K., Singles, R., Burgess, R., 1997: *The magnitude and extent of elevated ozone around the coasts of the British Isles*, Atmospheric Environment, **31** (13), pp. 1925-1932.

European Environment Agency (EEA), 2005: *Air pollution by ozone in Europe in summer 2004*, EEA Technical Report 3/2005, European Environment Agency (EEA).

European Environment Agency (EEA), 2006: *Air pollution by ozone in Europe in summer 2005*, EEA Technical Report 3/2006, European Environment Agency (EEA).

European Environment Agency (EEA), 2007: *Air pollution by ozone in Europe in summer 2006*, EEA Technical Report 5/2007, European Environment Agency (EEA).

European Environment Agency (EEA), 2008: *Air pollution by ozone across Europe during summer 2007*, EEA Technical Report 5/2008, European Environment Agency (EEA).

European Environment Agency (EEA), 2008b: *Annual European Community LRTAP Convention emission inventory report 1990-2006*, EEA Technical Report 7/2008, European Environment Agency (EEA).

European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), 2010: *EMEP activity data and emission database*, Centre on Emission Inventories and Projections, [<http://www.ceip.at/emission-data-webdab/>]. Acceso 10/09/09.



European Union, 1992: *Directiva 92/72/CE del Consejo Europeo, de 21 de Septiembre de 1992, sobre la contaminación atmosférica por ozono*, Diario Oficial de la Comunidad Europea, 13.10.1992, **L297**, pp. 1-7.

European Union, 1997: *Decisión 97/101/CE del Consejo Europeo, de 27 de enero de 1997, por la que se establece un intercambio recíproco de información y datos de las redes y estaciones aisladas de medición de la contaminación atmosférica en los Estados miembros*, Diario Oficial de la Comunidad Europea, 5.2.1997, **L35**, p.14.

European Union - European Commission, 1999: *Criteria for EUROAIRNET. The EEA air quality monitoring and information network*, EEA technical report nº 12, Copenhagen, 1999.

European Union - European Commission, 1999b: *Ozone position paper. Final version*, Ad hoc Working Group on Ozone Directive and Reduction Strategy Development, Office for Official Publication of the European Commission, Luxemburg, pp. 98-105.

European Union, 2002: *Directiva 2002/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de Febrero de 2002, relativa al ozono en el aire ambiente*, Diario Oficial de la Comunidad Europea, 9.3.2002, **L67**, pp. 14-30.

European Union, 2008: *Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de Mayo de 2008, relativa al ozono en el aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa*, Diario Oficial de la Comunidad Europea, 11.6.2008, **L152**, pp. 1-44.

Evans, M.J., Shallcross, D.E., Law, K.S., Wild, J.O.F., Simmonds, P.G., Spain, T.G., Berrisford, P., Methven, J., Lewis, A.C., McQuaid, J.B., Pilling, M.J., Bandy, B.J., Penkett, S.A., Pyle, J.A., 2000: *Evaluation of a Lagrangian box model using field measurements from EASE (Eastern Atlantic Summer Experiment) 1996*, Atmospheric Environment, **34**, pp. 3843-3863.

Evtyugina, M.G., Nunes, T., Pio, C., Costa C.S., 2006: *Photochemical pollution under sea breezes conditions, during summer, at the Portuguese West Coast*, Atmospheric Environment, **40**, pp. 6277-6293.

Evtyugina, M.G., Pio, C., Nunes, T., Pinho, P., Costa, C.S., 2007: *Photochemical ozone formation at Portugal West Coast under sea breeze conditions as assessed by master chemical mechanism model*, Atmospheric Environment, **41**, pp. 2171-2182.

Evtyugina, M.G., Nunes, T., Alves, C., Marques, M.C., 2009: *Photochemical pollution in a rural mountainous area in the northeast of Portugal*, Atmospheric Research, **92**, pp. 151-158.

Fernández García, F., 2001: *Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y su aplicación al área de Madrid*, Proyectos y métodos actuales en Climatología, Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A, **4**, pp. 41- 66.

Fernández, A., Martín-Vide, J., Díaz, Y. A., Mestre, A., 2003: *Aplicación de los procesos sinópticos objetivos a la península Ibérica en otoño*, Investigaciones Geográficas, **31**, 37-65, Eds. Universidad de Alicante.

Ferretti, M., Bussotti, F., Calderesi, M., 2007: *Ozone exposure, defoliation of beech *Fagus sylvatica* L. and visible foliar symptoms on native plants in selected plots of South-Western Europe*, Environmental Pollution, **145** (3), pp. 644-651.

Fiala, J., Cernikowsky, L., de Leeuw, F., Livorova, H., 2002: *Air pollution by ozone in Europe in summer 2002*, Topic Report 6/2002, European Environment Agency (EEA).

Fiala, J., Cernikowsky, L., de Leeuw, F., Kurfuerst, P., 2003: *Air pollution by ozone in Europe in summer 2003*, Topic Report 3/2003, European Environment Agency (EEA).

Fjæraa, A.M., 2006: *Ozone measurements 2004*, EMEP/CCC-Report 2/2004, Norwegian Institute for Air Research.

Fjæraa, A.M., Hjellbrekke, A-G., 2007: *Ozone measurements 2005*, EMEP/CCC-Report 2/2007, Norwegian Institute for Air Research.

Fjæraa, A.M., Hjellbrekke, A-G., 2009: *Ozone measurements 2007*, EMEP/CCC-Report 2/2009, Norwegian Institute for Air Research.

Font-Tullos, I., 1983: *Climatología de España y Portugal*, Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.

Font-Tullos, I., 2000: *Climatología de España y Portugal*, Eds. Universidad de Salamanca, Salamanca.

Fritsch, J. M., Chappell, C. F., 1980: *Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: convective parameterization*, Journal of the Atmospheric Sciences, **37**, pp. 1722–1733.

Fromage, A., 1996 : *Prévision des pointes de pollution atmosphérique état de l'art dans le monde et perspectives pour la région Ile-de-France*, Ecole des Mines de Paris - Institut Supérieur d'Ingénierie et de Gestion de l'Environnement.

Fumagalli, I., Gimeno, B., Velissariou, D., De Temmerman, L., Mills, G., 2001: *Evidence of ozone-induced adverse effects on crops in the Mediterranean region*, Atmospheric Environment, **35**, pp. 2583-2587.

Gangoiti G., Millán M., Salvador R., Mantilla E., 2001: *Long-range transport and recirculation of pollutants in the western Mediterranean during the project Regional Cycles on Air Pollution in the West-Central Mediterranean Area*, Atmospheric Environment, **35**, pp. 6267-6276.

Gangoiti G., Alonso L., Navazo M., Albizuri A., Pérez-Landa G., Matabuena M., Valdenebro V., Maruri M., García J.A., Millán M., 2002: *Regional transport of pollutants over the bay of Biscay: analysis of an ozone episode under a blocking anticyclone in west-central Europe*, Atmospheric Environment, **36**, pp. 1349-1361.

Gangoiti, G., Albizuri, A., Alonso, A., Navazo, M., Matabuena, M., Valdenebro, V., García, J.A., Millán, M., 2006: *Sub-continental transport mechanisms and pathways during two ozone episodes in northern Spain*, Atmospheric Chemistry and Physics, **6**, pp. 1469-1484.

García, M.A., Sánchez, M.L., Pérez, I.A., De Torre, B., 2005: *Ground level ozone concentrations at a rural location in northern Spain*, Science of the Total Environment, **348**, pp. 135-150.

Gilbert, R.O., 1987: *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*, ed. Van Nostrand Reinhold, New York.

Gimeno, B.S., Bermejo, V., Reinert, R.A., Zheng, Y., Barnes, J.D., 1999: *Adverse effects of ambient ozone on watermelon yield and physiology at a rural site in Eastern Spain*, New Phytology, **144** (2), pp. 245-260.

Gimeno, L., Hernández, E., Rúa, A., García, R., Martín, I., 1999b: *Surface ozone in Spain*, Chemosphere, **38** (13), pp. 3061-3074.

Gonçalves, M., Jiménez, P., Baldasano, J. M., 2009: *Contribution of atmospheric processes affecting the dynamics of air pollution in South-Western Europe during a typical summertime photochemical episode*, Atmospheric Chemistry and Physics, **9**, pp. 849-864.

Grell, G.A., Dudhia, J., Stauffer, D.R., 1995: *A description of the Fifth-Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model (MM5)*, Technical Report NCAR/TN-398+STR, NCAR, Boulder (Co), USA.

- Hanna, S.R., Chang, J.C., 1995: *Relations between meteorology and ozone in Lake Michigan region*, Journal of Applied Meteorology, **34**, pp 670-678.
- Hart, M., De Dear, R., Hyde, R., 2006: *A synoptic climatology of tropospheric ozone episodes in Sydney, Australia*, International Journal of Climatology, **26**, pp. 1635-1649.
- Hastie, D.R., Narayan, J., Schiller, C., Niki, H., Shepson, P.B., Sills, D.M.L., Taylor, P.A., Moroz, W., Drummond, J.W., Reid, N., Taylor, R., Roussel, P.B., Melo, O.T., 1999: *Observational evidence for the impact of the lake breeze circulation on ozone concentrations in Southern Ontario*, Atmospheric Environment, **33**(2) pp. 323–335.
- Hernández, A., García Codrón, J.C., Rasilla, D. F., 2004: *Análisis de la contaminación atmosférica en el entorno de la bahía de Santander: primeros resultados*, El clima, entre el mar y la montaña [aportaciones presentadas al IV Congreso de la Asociación Española de Climatología, Santander, 2-5 de noviembre de 2004], Serie A, **4**, pp. 661-670.
- Hjellbrekke, A-G., Solberg, S., 2004: *Ozone measurements 2002*, EMEP/CCC-Report 2/2004, Norwegian Institute for Air Research.
- Holton, J. R., Douglass, A. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Rood, R. B., Pfister, L., 1996: *Stratosphere-troposphere exchange*, Review of Geophysics, **33**, pp. 403-439.
- Hong, S. Y., Pan, H. L., 1996: *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*, Monthly Weather Review, **124**, pp. 2322-2339.
- Hurley, P.J., Manins, P.C., 1995: *Metorological modelling on high-ozone days in Perth, Western Australia*, Journal of Applied Meteorology, **34**, pp. 1645-1652.
- Instituto Nacional de Estadística, 2009: *Cifras de población y Censos demográficos*. [www.ine.es/inebmenu/mnu\_cifraspob.htm]. Acceso 25/04/09.
- Jaffe, D., Ray, J., 2007: *Increase in surface ozone at rural sites in the western US*, Atmospheric Environment, **41** (26), pp. 5452-5463.
- Jiménez, P., Parra, R., Gassó, S., Baldasano, J.M., 2005: *Modeling the ozone weekend effect in very complex terrains: a case study in the Northeastern Iberian Peninsula*, Atmospheric Environment, **39**, pp. 429-444.
- Jiménez, P., Jorbá, O., Parra, R., Baldasano, J. M., 2006: *Evaluation of MM5-EMICAT2000-CMAQ performance and sensitivity in complex terrain: high-resolution application to the northeastern Iberian Peninsula*, Atmospheric Environment, **40**, pp. 5056-5072.
- Jiménez, P., Lelieveld, J., Baldasano, J. M., 2006b: *Multiscale modeling of air pollutants dynamics in the northwestern Mediterranean basin during a typical summertime episode*, Journal of Geophysical Research., **111**, D18306, doi:10.1029/2005JD006516.
- Jonson, J.E., Simpson, D., Fagerli, H., Solberg, S., 2006: *Can we explain the trends in European ozone levels?*, Atmospheric Chemistry and Physics, **6**, pp. 51-66.
- Jorbá, O., 2005: *Simulación de los campos de viento de la península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph D., 1996: *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*, Bulletin of American Meteorological Society, **77**, pp. 437- 471.

- Katsoulis, B.D., 1999: *The potential for long-range transport of air-pollutants into Greece: a climatological analysis*, Science of the Total Environment, **231** (2-3), pp. 101-113.
- Kent, A., 2003: *Air pollution forecasting: ozone pollution episode report (September 2003)*, AEA Technology Environment, National Environmental Technology Centre, UK Air Quality Archive. [<http://www.airquality.co.uk/reports/>]. Acceso 15/05/2008.
- Kunz, H., Speth, P., 1997: *Variability of near-ground ozone concentrations during cold front passages –a possible effect of tropopause folding events*, Journal of Applied Atmospheric Chemistry, **28**, pp. 77-95.
- Lelieveld, J., Van Aardenne, J., Fischer, H., de Reus, M., Williams, J., Winkler, P., 2004: *Increasing ozone over the Atlantic Ocean*, **304**, pp. 1483-1487.
- Lindskog, A., Kindbom, K., 2001: *Ozone in remote areas: seasonal cycles and trends*, TOR-2 annual report 1999, EUROTRAC International Scientific Secretariat, GSFNational Research Center for Environment and Health, Munich, Germany, pp. 99-102.
- Linés, A., 1981: *Perturbaciones típicas que afectan a la península Ibérica y precipitaciones asociadas*, Instituto Nacional de Meteorología, Madrid.
- Lippmann, M., 1991: *Health effects of tropospheric ozone*, Environment Science Technology, **25**(12), pp. 1954-1962.
- Liu, S., Trainer, M., Fehsenfeld, F., Parrish, D., Williams, E., Fahey, D., Hübler, G., and Murphy, P., 1987: *Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions*, Journal of Geophysical Research, **92**, pp. 4191-4207.
- Loader, A., Lampert, L., 2005: *Air Quality Monitoring in Northern Ireland 2003*, AEAT/ENV/R/1868, ISBN 1-905127-13-8, AEA Technology Environment, National Environmental Technology Centre.
- Logan, J.A., 1985: *Tropospheric ozone: seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence*, Journal of Geophysical Research, **90** (D6), pp. 10463-10482.
- Lorenz, M., Fischer, R., Becher, G., Granke, O., Seidling, W., Ferretti, M., Schaub, M., Calatayud, V., Bacaro, G., Gerosa, G., Rocchini, D., Sanz, M., 2008: *Forest Condition in Europe*, 2008 Technical Report of ICP Forests, Hamburg, Institute for World Forestry, 107 pp.
- Mantilla, M., Castell, N., 2002-2007: *Informes finales Previozono 2002-2007: Programa especial de vigilancia del ozono troposférico en la Comunidad Valenciana*, Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Generalitat Valenciana.
- Martín, M., Plaza, J., Andrés, M. D., Bezares, J. C., Millán, M., 1991: *Comparative study of seasonal air pollutant behavior in a Mediterranean coastal site: Castellón (Spain)*, Atmospheric Environment, **25A** (8), pp. 1523-1535.
- Martínez Cortizas, A., Pérez Alberti, A., 1999: *Atlas Climático de Galicia*, Xunta de Galicia, Santiago de Compostela.
- Martín-Vide, J., 1991: *Mapas del tiempo: fundamentos, interpretación e imágenes de satélite*, ed. Oikos-tau, Barcelona
- Martín-Vide, J., 2001: *Limitations of an objective weather-typing system for the Iberian peninsula*. Weather, **56**( 7), pp. 248-250.

Martín-Vide, J., 2002: *Aplicación de la clasificación sinóptica automática de Jenkinson y Collison a días de precipitación torrencial en el este de España*, La información climática como herramienta de gestión ambiental, 123-127, Eds. Cuadrat, Vicente y Sanz, Universidad de Zaragoza y Asociación de Geógrafos Españoles.

McKendry, I.G., 1994: *Synoptic circulation and summertime ground-level ozone concentrations at Vancouver, British Columbia*, Journal of Applied Meteorology, **33**, pp. 627- 641.

McKendry, I.G., Steyn, D.G., Banta, R.M., Strapp, W., Anlauf, K., Pottier, J., 1998: *Daytime photochemical pollutant transport over a tributary valley lake in southwestern British Columbia*, Journal of Applied Meteorology, **37**(4), pp. 393-404.

Memmesheimer, M., Jakobs, H.J., Piekorz, G., Ebel, A., Kerschgens, M.J., Friese, E., Feldmann, H., Geiß, H., 2001: *Air quality modeling with the EURAD model*, Proceedings of the 7th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Belgirate, 2001.

Méndez, M. R., Souto, J. A., Vilá-Guerau de Arellano, J., Lucas, T., Casares, J., 1997: *Dispersion and transformation of nitrogen oxides emitted from a point source*, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Measurements and Modelling in Environmental Pollution Congress, Madrid, pp. 179-188.

MeteoGalicia, 2002-2007: *Anuarios climatológicos de Galicia 2002-2007*, Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia.

MeteoGalicia, 2009: *Radiosondaxe*, Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia. [[http://www2.meteogalicia.es/galego/observacion/radiosondaxe/radiosondaxe\\_tmp.asp](http://www2.meteogalicia.es/galego/observacion/radiosondaxe/radiosondaxe_tmp.asp)]. Acceso 20/10/09.

MeteoGalicia, 2010: *MEIGA-Xeollador*, Consellería de Medio Ambiente, Xunta de Galicia. Comunicación personal.

Millán, M., Artíñano, B., Alonso, L., Navazo, M., Castro, M., 1991: *The effect of meso-scale flow on regional and long-range atmospheric transport in the western Mediterranean area*, Atmospheric Environment, **25A** (5-6), pp. 949-963.

Millán, M., Salvador, R., Mantilla, E., Artíñano, B., 1996: *Meteorology and photochemical air pollution in Southern Europe: experimental results from EC research projects*, Atmospheric Environment, **30** (12), pp. 1909-1924.

Millán, M., Salvador, R., Mantilla, E., Kallos, G., 1997: *Photooxidant dynamics in the Mediterranean basin in summer: results from EC research projects*, Journal of Geophysical Research, **102** (D7), pp. 8811-8823.

Millán, M., Mantilla, E., Salvador, R., Carratala, R., Sanz, M.J., Alonso, L., Gangoiti, G., Navazo, M., 2000: *Ozone cycles in the Mediterranean basin: Interpretation of monitoring data in complex coastal terrain*, Journal of Applied Meteorology, **39**, pp. 487-508.

Millán, M., Sanz, M.J., Salvador, R., Mantilla, E., 2002: *Atmospheric dynamics and ozone cycles related to nitrogen deposition in the Western Mediterranean*, Environmental Pollution, **118**, pp. 167-186.

Mills, G., Holland, M., Buse, A., Ciderby, S., Hayes, F., Emberson, L., Cambridge, H., Ashmore, M., Terry, A., 2003: *Introducing response modifying factors into a risk assessment for ozone effects on crops in Europe*. En: Karlsson, P.E., Sellden, G., Pleijel, H. (eds.) Establishing ozone critical levels II. UNECE Workshop report-crops, IVL report B 1523, pp. 74-88.

Ministerio de la Presidencia, 2004: *Real Decreto 1796/2003, de 26 de Diciembre, relativo al ozono en el aire ambiente*, Boletín Oficial del Estado (BOE), 13.01.2004, **11**, pp.1071-1081.

Ministerio de Medio Ambiente, 2004-2008: *Memorias Medio Ambiente en España 2004-2008*. [www.mma.es/secciones/info\_estadistica\_ambiental/estadisticas\_info/memorias/]. Acceso 13/10/09.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009: *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes a la Atmósfera*, Calidad y Evaluación Ambiental. [www.mma.es/portal/secciones/calidad\_contaminacion/atmosfera/emisiones/inventario.htm]. Acceso 14/09/09.

Monks, P.S., 2000: *A review of observations and origins of the spring ozone maximum*, Atmospheric Environment, **34**, pp. 3545-3561.

Naranjo, L., Pérez Muñuzuri, 2006: *“A variabilidade natural do clima en Galicia”*, Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible, Xunta de Galicia, 300 pp.

National Expert Group on Transboundary Air Pollution (NETGAP), 2001: *Transboundary air pollution: acidification, eutrophication and ground-level ozone in the UK*. [http://www.freshwaters.org.uk/resources/documents/negtap\_2001\_final\_report.php]. Acceso 16/12/09.

National Oceanic and Atmospheric Administration, 2008: *NOAA/ESRL Radiosonde Database Access*. [http://esrl.noaa.gov/raobs/]. Acceso 15/03/2008.

National Research Council (USA), 1991: *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*, Commission on Geosciences, Environment and Resources (CGER), eds. National Academic Press, Washington, D.C., pp. 594.

Norwegian Institute for Air Research, 2005: *The development of European surface ozone. Implications for a revised abatement policy*, EMEP/CCC - Report 1/2005.

O'Hare, G.P., Wilby, R., 1995: *A review of ozone pollution in the United Kingdom and Ireland with an analysis using Lamb weather types*, The Geographical Journal, **161** (1), pp. 1-20.

O'Hare, A., 1997: *The synoptic control of tropospheric ozone pollution during 24–28 June 1994*, Weather, **52**, pp. 378-382.

Penkett, S.A., Evans, M.J., Reeves, C.E., Law, K.S., Monks, P.S., Bauguitte, S.J.B., Pyle, J.A., Green, T.J., Bandy, B.J., Mills, G., Cardenas, L.M., Barjat, H., Kley, D., Schmitgen, S., Kent, J.M., Dewey, K., Methven, J., 2004: *Long-range transport of ozone and related pollutants over the North Atlantic in spring and summer*, Atmospheric Chemistry and Physics Discussion, **4**, pp. 4407-4454.

Peña, R.M., García, S., Herrero, C., Lucas, T., 2000: *Spatial and temporal ozone pattern concentrations in a NW region of Spain*, Water, Air and Soil Pollution, **117**, pp. 289-303.

Pont, V., Fontan, J., Lopez, A., 2003: *Variability of tropospheric ozone concentrations: comparison of ground-level data with aircraft measurements during the “O3 Reg” campaign (19–21 July 2000)*, Atmospheric Research, **66**, pp. 83-105.

PORG (Photochemical Oxidants Review Group), 1997: *Ozone in the United Kingdom*, Fourth Report, Prepared at the Request of the Department of the Environment, Transport and the Regions, London, 234 pp.

Precedo Ledo, A., Sancho Comíns, J., 2001: *Atlas de Galicia (Tomo I: Medio Natural)*, Sociedade para o Desenvolvemento Comarcal de Galicia, Xunta de Galicia, pp. 137-155.

Prev'Air, 2009: *Prévisions et observations de la qualité de l'air en France et en Europe*, [http://www.prevoir.org/en/index.php]. Acceso 23/02/09.

- Ortega, S., Soler, M.R., Beneito, J., Pino, D., 2004: *Evaluation of two ozone air quality modelling systems*, Atmospheric Chemistry and Physics, **4**, pp. 1389-1388.
- Rappenglück, B., Oyola, P., Olaeta, I., Fabian, P., 2000: *The Evolution of Photochemical Smog in the Metropolitan Area of Santiago de Chile*, Journal of Applied Meteorology, **39**(3), pp. 275-290.
- Rasilla, D., 2003: *Aplicación de un método de clasificación sinóptica a la península Ibérica*, Investigaciones Geográficas, **30**, pp. 27-45.
- Reed, R.J., 1955: *A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis*, Journal of Meteorology, **12**, pp. 226-237.
- Reitebuch, O., Strassburger, A., Emeis, S., Kuttler, W., 2000: *Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observation and surface measurements*, Atmospheric Environment, **34**, pp. 4315-4329.
- Rhenish Institute for Environment Research, 2010: *The EURAD project*, Univesity of Cologne. [[http://www.eurad.uni-koeln.de/index\\_e.html?/index\\_home\\_e.html](http://www.eurad.uni-koeln.de/index_e.html?/index_home_e.html)]. Acceso 25/03/09.
- Ribalaygua, J., R. Borén, 1996: *Clasificación sinóptica a partir de patrones de precipitación*, Biblioteca de Módulos TEMPO de AEMet: Modelos conceptuales a escala sinóptica, [[http://www.aemet.es/es/divulgacion/varios/detalles/biblioteca\\_tempoweb](http://www.aemet.es/es/divulgacion/varios/detalles/biblioteca_tempoweb)]. Acceso 12/02/10.
- Ribas, A., Peñuelas, J., 2004: *Temporal patterns of surface ozone levels in different habitats of the North Western Mediterranean basin*, Atmospheric Environment, **38**, pp. 985-992.
- Ribas, A., Peñuelas, J., 2006: *Surface ozone mixing ratio increase with altitude in a transect in the Catalan Pyrenees*, **40**, pp. 7308-7315.
- Rodríguez, S., Torres, C., Guerra, J.C., Cuevas, E., 2004: *Transport pathways of ozone to marine and free-troposphere sites in Tenerife, Canary Islands*, Atmospheric Environment, **38**, pp. 4733-4747.
- Rohli, R., Russo, M., Vega, A., Cole, J., 2004: *Tropospheric Ozone in Louisiana and Synoptic Circulation*, Journal of Applied Meteorology, **43** (24), pp 1438- 1451.
- Rolph, G.D., Draxler, R.R., 1990: *Sensitivity of 3-dimensional trajectories to the spatial and temporal densities of the wind-field*, Journal of Applied Meteorology, **29** (10), pp. 1043-1054.
- Saavedra, S., Méndez, M.R., Souto, J.A., Bermúdez, J.L., Vellón, M., Costoya, M., 2007: *Regional transport of tropospheric ozone: a case study in the northwest coast of Iberian peninsula*, Air Pollution Modeling and its Application XIX (Proceedings of the 29<sup>th</sup> NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application Congress of Environmental Engineering, Aveiro, Portugal), eds. C. Borrego and A.I. Miranda, cap. 8., pp. 667-668.
- Salmond, J.A., McKendry, I.G., 2002: *Secondary ozone maxima in a very stable nocturnal boundary layer: observations from the Lower Fraser Valley, BC*, Atmospheric Environment, **36**, pp. 5771-5782.
- Sánchez, M.L., de Torre, B., García, M.A., Pérez, I., 2005 : *Ozone concentrations at a high altitude station in the Central Massif (Spain)*, Chemosphere, **60**, pp. 576-584.
- Sánchez, M.L., de Torre, B., García, M.A., Pérez, I., 2007: *Ground-level ozone and ozone vertical profile measurements close to the foothills of the Guadarrama mountain range (Spain)*, Atmospheric Environment, **41**, pp. 1302-1314.
- Sanz, M.J., Millán, M., 1998: *The dynamics of aged airmasses and ozone in the western Mediterranean: relevance to forest ecosystems*, Chemosphere, **36** (4-5), pp. 1089-1094.



Sanz, M.J., Carratala, A., Mantilla, E., Dieguez, J.J., Millán, M., 1999: *Daily ozone patterns and AOT40 index on the East Coast of the Iberian Peninsula*, Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar-Terrestrial and Planetary Science, **24** (5), pp. 491-494.

Sanz, M.J., Calatayud, V., Calvo, E., 2000: *Spatial pattern of ozone injury in Aleppo pine related to air pollution dynamics in a coastal-mountain region of eastern Spain*, Environmental Pollution, **108**, pp. 239-247.

Sanz, M. J., Carratalá, A., Gimeno, C., Millán, M., 2002: *Atmospheric nitrogen deposition on the east coast of Spain: relevance of dry deposition in semi-arid mediterranean regions*, Environmental Pollution, **118**, pp. 259-272.

Scheel, H. E., Areskoug, H., Geiß, H., Gomiscek, B., Granby, K., Haszpra, L., Klasinc, L., Kley, D., Laurila, T., Lindskog, A., Roemer, M., Schmitt, R., Simmonds, P., Solberg, S., Toupance, G., 1997: *On the spatial distribution and seasonal variation of lower-troposphere ozone over Europe Temporal Variability of Tropospheric Ozone over Europe*, Journal of Atmospheric Chemistry, **28**, pp.11-28.

Schmidt, H., Derognat, C., Vautard, R., Beekmann, M., 2001: *A comparison of simulated and observed ozone mixing ratios for the summer of 1998 in Western Europe*, Atmospheric Environment, **35** (36), pp. 6277–6297.

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 1998: *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, eds. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 1326.

Shapiro, M.A., 1980: *Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical constituents between the stratosphere and troposphere*, Journal of Atmospheric Science, **37**, pp. 994-1004.

Simmonds, P.G., Seuring, S., Nickless, G., Derwent, R.G., 1997: *Segregation and interpretation of ozone and carbon monoxide measurements by air mass origin at the TOR station Mace Head, Ireland from 1987 to 1995*, Journal of Atmospheric Chemistry, **28**, pp. 45-59.

Simmonds, P.G., Derwent, R.G., Manning, A.J., Spain, G., 2004: *Significant growth in surface ozone at Mace Head, Ireland, 1987-2003*, Atmospheric Environment, **38**, pp. 4769-4778.

Sistema de Información Ambiental del Principado de Asturias, 2008: *Calidad del Aire: Red Automática Gestionada por el Principado de Asturias: Estaciones Remotas: Datos Históricos*, [<http://tematico.asturias.es/mediambi/siapa/web/aire/automatica/index.php>]. Acceso 25/06/2008.

Skelly, J.M., Innes, J.L., Savage, J.E., Snyder, K.R., Vanderheyden, D., Zhang, J., Sanz, M.J., 1999: *Observation and confirmation of foliar ozone symptoms of native plant species of Switzerland and southern Spain*, Water, Air & Soil Pollution, **116**, pp. 227-234.

Solberg, S., 2003: *Monitoring of boundary layer ozone in Norway from 1977 to 2002*, Norwegian Institute for Air Research, NILU OR 85/2003.

Solberg, S., Coddeville, P., Forster, C., Hov, O., Orsolini, Y., Uhse, K., 2005: *European surface ozone in the extreme summer 2003*, Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, **5**, pp. 9003-9038.

Solberg, S., Bergström, R., Langner, J., Laurila, T., Lindskog, A., 2005b: *Changes in Nordic surface ozone episodes due to European emission reductions in the 1990s*, Atmospheric Environment, **39** (1), pp. 179-192.

Soler, M.R., Hinojosa, J., Bravo, M., Pino, D., Vilà-Guerau de Arellano, J., 2004: *Analyzing the basic features of different complex terrain flows by means of a Doppler Sodar and a numerical model: Some implications for air pollution problems*, Meteorology and Atmospheric Physics, **85** (1-3), pp. 141-154.

Soler, M.R., Ortega, S., Soriano, C., Pino, D., Alarcón, M., Aymamí, J., 2004b: *Study of pollutant transport in complex terrain using different meteorological and photochemical modelling systems*, 9<sup>th</sup> International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Garmisch-Partenkirchen (Germany), June 2004, volume 2, pp 310-314.

Spellman, G., 1998: *Analyzing air pollution meteorology*, Weather, **53**, pp. 35-42.

Spellman, G., 2000: *The application of an objective weather – typing system to the Iberian peninsula*, Weather, **55**, pp. 375-385.

Stull, R.B., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 688.

Targa, J., 2005: *Ozone Pollution Episode Report (June-July 2005)*, AEA Technology Environment, National Environmental Technology Centre, UK Air Quality Archive, [<http://www.airquality.co.uk/reports/>]. Acceso 05/02/2008.

Targa, J., 2006: *Air Pollution Forecasting: Ozone Pollution Episode Report (June-July 2006)*, AEA/ENV/R/2168, AEA Technology Environment, National Environmental Technology Centre.

Tarrasón, L., Jonson, J.E., Fagerli, H., Benedictow, A., Wind, P., Simpson, D., Klein, H., 2003: *Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe*, EMEP Status Report 1/2003 - Part III (Source-receptor relationships), The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway, 2003.

Thompson, M.L., Reynolds, J., Cox, L.H., Guttorp, P., Sampson, P.D., 2001: *A review of statistical methods for the meteorological adjustment of tropospheric ozone*, Atmospheric Environment, **35**, pp. 617-630.

Toll, I., Baldasano, J.M., 2000: *Modeling of photochemical air pollution in the Barcelona area with highly disaggregated anthropogenic and biogenic emissions*, Atmospheric Environment, **34**, pp. 3069-3084.

Touloumi, G., Katsouyanni, K., Zmirou, D., Schwartz, J., Spix, C., Ponce de Leon, A., Tobias, A., Quennel, P., Rabchenko, D., Bacharova, L., Bisanti, L., Vonk, J. M., Ponka, A., 1997: *Short-term Effects of Ambient Oxidant Exposure on Mortality: A Combined Analysis within the APHEA Project*, American Journal of Epidemiology, **146** (2), pp. 177-185.

Ulke, A. G., 2004: *Application of Back-Trajectory Techniques to the Characterization of the Regional Transport of Pollutants to Buenos Aires, Argentina*, Air Pollution Modeling and Its Application XVII, **8**, pp. 677-679.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2006: *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants*, USEPA, Office of Research and Development, Washington D.C., vol. 1, 821 pp.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2006b: *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants*, USEPA, Office of Research and Development, Washington D.C., vol. 2, 873 pp.

Valdenebro, V., Gangoiti, G., Albizuri, A., Alonso, L., Navazo, M., García, J. A., Millán, M.M., 2008: *Evolution of the ozone episodes in Northern Iberia (Cantabric and Pyreneic regions) under West European Atlantic blocking anticyclones*, Air Pollution Modeling and Its Application XIX, Proceedings of the 29th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and Its Application, Aveiro (Portugal), pp. 671-672.

Vautard, R., Beekmann, M., Roux, J., Gombert, D., 2001: *Validation of a deterministic forecasting system for the ozone concentrations over the Paris area*, Atmospheric Environment **35**, pp. 2449–2461.

- Vingarzan, R., 2004: *A review of surface ozone background levels and trends*, Atmospheric Environment, **38**, pp. 3431-3442.
- Volz, A., Kley, D., 1988: *Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements in the nineteenth century*, Nature, **332**, pp. 240-242.
- Wang, Y., Jacob, D.J., Logan, J.A., 1998: *Global simulation of tropospheric O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-hydrocarbon chemistry. 3. Origin of tropospheric ozone and effects on non-methane hydrocarbons*, Journal of Geophysical Research 103 (10), pp. 10757-10767.
- Weisel, C., Cody, R., Liou, P., 1995: *Relationship between Summertime Ambient Ozone Levels and Emergency Department Visits for Asthma in Central New Jersey*, Environmental Health Perspectives, **103** (2), pp. 97-102.
- Wimmers, A. J., Moody, J. L., Browell, E. V., Hair, J. W., Grant, W. B., Butler, C. F., Fenn, M. A., Schmidt, C. C., Li, J., Ridley, B. A., 2003: *Signatures of tropopause folding in satellite imagery*, Journal of Geophysical Research, **108** (D4), pp. 8.1-8.11.
- Wetterzentrale, 2010: *Wetterzentrale Top Karten*. [<http://www.wetterzentrale.de>]. Acceso 10/02/10.
- Wu, H.W.Y., Chan, L.Y., 2001: *Surface ozone trends in Hong Kong in 1985–1995*, Environment International, **26**, pp. 213-222.
- Xu, D., Yap D., Taylor P.A., 1996: *Meteorologically adjusted ground level ozone trends in Ontario*, Atmospheric Environment, **30** (7), pp. 1117-1124.
- Yarnal, B., 1993: *Synoptic climatology environmental analysis*, ed. Belhaven Press, London.
- Zannetti, P., 2001: *"Air pollution modeling : theories, computational methods and available software"*, ed. Van Nostrand Reinhold, New York.